

## شبیه‌سازی آسیای خودشکن کارخانه فرآوری چغارت با استفاده از نرم‌افزار MODSIM

سعید حسنی صدرآبادی<sup>۱</sup>، علی دهقانی<sup>۲\*</sup>، مهدی خسروی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی،  
Tel: 09132596109, E-mail: s\_hassani\_s@yahoo.com

۲- استادیار دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

۳- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، مرکز تحقیقات مهندسی وابسته به دانشگاه یزد، گروه پژوهشی معدن

(دریافت ۱۷ شهریور ۱۳۸۸، پذیرش ۹ اسفند ۱۳۸۸)

### چکیده

آسیاهای خودشکن، جایگزین چندین مرحله سنگ‌شکنی و آسیاکنی در مدارهای خردایش شده‌اند. این آسیاها نسبت به تغییر پارامترهای عملیاتی، به ویژه مشخصات بار اولیه، بسیار حساس هستند. شبیه‌سازی یکی از ابزارهای بهبود کارایی آسیاهای خودشکن است. بدین منظور لازم است که آزمایش‌های خردایش بر روی بار ورودی به آسیا انجام شود. در این تحقیق، آزمایش‌های خردایش شامل ضربه، سایش و خودشکست بر روی نمونه‌هایی از بار اولیه آسیای خودشکن چغارت انجام شد. مقادیر توابع شکست و انتخاب، پارامترهای سایش و مدل خودشکست نمونه‌های معرف تعیین شدند. زمان ماند متوسط آسیای خودشکن نیز اندازه‌گیری شد. با استفاده از نتایج آزمایش‌های فوق و اطلاعات موجود در کارخانه، آسیای خودشکن چغارت که در مدار بسته با سرند موزی قرار دارد، به کمک نرم‌افزار MODSIM (نرم‌افزار شبیه‌سازی مدارهای کانه‌آرایی)، شبیه‌سازی گردید. با استفاده از این روش، توزیع ابعادی محصول خروجی از آسیای خودشکن تعیین شد. نتایج حاصل با داده‌های کارخانه همخوانی خوبی داشت. با استفاده از این تکنیک می‌توان تأثیر تغییر پارامترهای عملیاتی بر روی دانه‌بندی محصول آسیای خودشکن را پیش‌بینی کرد.

### کلمات کلیدی

شبیه‌سازی، آسیای خودشکن چغارت، مکانیزم‌های شکست، نرم‌افزار MODSIM.

\* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

## ۱- مقدمه

آسیا کردن یکی از مهم‌ترین و در عین حال پرهزینه‌ترین مراحل فرآوری مواد معدنی است که حدود ۷۰٪ از انرژی مصرفی کارخانه را به خود اختصاص می‌دهد. از سوی دیگر به دلیل تأثیر بسیار زیاد دانه‌بندی محصول آسیا بر فرآیندهای بعدی (جریان‌های پائین دست)، غالباً این محصول باید دارای خصوصیات از پیش تعیین شده‌ای باشد. بنابراین بهینه‌سازی عملکرد آسیاها برای دستیابی به محصول با کیفیت مورد نظر، می‌تواند از اولین اهداف در افزایش کیفیت عملکرد در کارخانه باشد. از این رو برای بهبود کارایی آسیاها، از تکنیک‌های مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی رایانه‌ای استفاده می‌شود. فناوری شبیه‌سازی مدارهای آسیاها گردان، از حدود سی سال پیش مورد استفاده قرار گرفته است و همچنان با توسعه مدل‌های ریاضی، کامل‌تر و توانمندتر می‌گردد. مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی رایانه‌ای، روش‌های مؤثر و مفیدی جهت طراحی، تحلیل، بهینه‌سازی و کنترل خودکار عملیات واحدهای مختلف می‌باشند که در صنایع فرآوری مواد معدنی، اخیراً گسترش فراوانی یافته است. از این رو پرداختن به این موضوع برای بهینه‌سازی برخی از این تجهیزات که در مقیاس صنعتی بسیار پرهزینه می‌باشند و مقدار زیادی انرژی نیز مصرف می‌کنند، می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد [۱].

با بررسی اجمالی بر روی معادن بزرگ می‌توان دریافت که در بیست سال گذشته، اکثر پروژه‌های آسیاکنی جدید و یا توسعه‌ای، از تکنولوژی آسیاکنی خودشکن و یا نیمه‌خودشکن استفاده کرده‌اند که این امر در ایران نیز، در حال گسترش می‌باشد و شناخت نحوه عملکرد آن برای بالا بردن بهره‌وری تولید در کارخانه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در واقع استفاده از آسیاها، خودشکن و یا نیمه‌خودشکن، به دلیل به کارگیری ماده معدنی به عنوان واسطه خردایش و در نتیجه افزایش ظرفیت نرم‌کنی و همچنین وارد نشدن مواد خارجی به ماده معدنی و آلوده نشدن آن و به طور کلی کاهش قابل توجه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی عمومیت یافته است [۲].

معدن سنگ آهن چغارت در استان یزد واقع است. این معدن به عنوان بزرگ‌ترین تولید کننده سنگ آهن مورد نیاز برای کارخانه ذوب آهن اصفهان فعالیت می‌کند. ذخیره قابل استخراج معدن چغارت ۱۷۷ میلیون تن برآورد شده است که ۹۶ میلیون تن آن به دلیل عیار بالای آهن و فسفر پائین، پس از خردایش و دانه‌بندی، به صورت مستقیم قابل مصرف در صنایع فولاد بوده و مابقی پس از استخراج با عیار ۵۲-۳۷٪ آهن، جهت پرعیارسازی به کارخانه فرآوری ارسال می‌گردد.

عیار آهن در کنسانتره تولیدی در این کارخانه به حدود ۶۷-۶۶٪ و با میزان فسفر کمتر از ۰/۱۲٪ می‌رسد تا قابل ارائه به بازار مصرف باشد. کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت که در سال ۱۳۸۴ به بهره‌برداری رسید، شامل دو خط تولید مستقل برای پرعیارسازی کانسنگ‌های پر عیار و پر فسفر چغارت و کم عیار و کم فسفر سه‌چاهون می‌باشد. مقدار خوراک ورودی کارخانه برای هر دو خط تولید، جمعاً ۵/۷ میلیون تن در سال در نظر گرفته شده است. ظرفیت تولید هر یک از خطوط، ۱/۶ میلیون تن (مجموعاً ۳/۲ میلیون تن) در سال می‌باشد که قابل افزایش تا ۴ میلیون تن خواهد بود. در این کارخانه، سنگ آهن پر عیار و پر فسفر چغارت پس از خردایش در آسیای خودشکن، و سنگ آهن کم عیار و کم فسفر سه‌چاهون پس از خردایش در آسیاهای خودشکن و گلوله‌ای، توسط جداکننده‌های مغناطیسی شدت پائین و بالا، پر عیار و آماده ارسال به واحدهای فولادسازی می‌گردند [۳].

در این تحقیق، جهت شبیه‌سازی آسیای خودشکن کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت در مدار چغارت، از نرم‌افزار MODSIM (نرم‌افزار شبیه‌سازی مدارهای کانه‌آرایی) (نسخه 3. 6. 14) استفاده گردید. هدف استفاده از ابزار شبیه‌سازی در مدار خردایش فعلی کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت، بررسی امکان بهینه‌سازی آسیای خودشکن آن است. شبیه‌سازی به کمک این نرم‌افزار، مستلزم شناخت دقیق مدل‌ها و تعیین پارامترهای آن می‌باشد. در این ارتباط لازم بود تا برخی از پارامترهای مورد نیاز این نرم‌افزار مورد محاسبه قرار گرفته و سپس در نرم‌افزار به کار برده شوند [۴].

## ۲- روش انجام تحقیق و شرح آزمایش‌ها

سه مکانیزم مشخص برای کاهش ابعاد در آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن مشخص شده است [۵]:

۱- سایش<sup>۱</sup> ۲- ضربه<sup>۲</sup> ۳- خودشکست<sup>۳</sup>

کینگ<sup>۴</sup> این مکانیزم‌ها را به صورت زیر بیان کرده است [۵]:

- سایش پدیده‌ای سطحی می‌باشد که در اثر حرکت دو ذره به موازات سطوح تماسشان ایجاد شده و ذرات کوچکی را از دو ذره جدا می‌نماید.

- شکست ضربه‌ای وقتی اتفاق می‌افتد که یک ذره کوچک بین دو ذره بزرگ بر اثر برخورد یا حرکت غلطی، تحت فشار قرار می‌گیرد.

- پدیده خودشکست سنگ معدن به دلیل برخورد ذره با ابعاد بزرگ به بدنه آسیا پس از سقوط آزاد اتفاق می‌افتد.

شکست با استفاده از یک تابع توزیع لگاریتمی ساده، مدل شده و به صورت زیر بیان می‌شود [۵]:

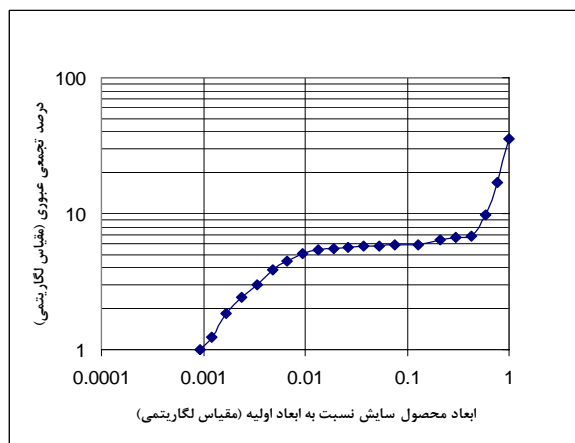
$$A(x, D_A) = \left( \frac{x}{D_A} \right)^{1.5} \quad (2)$$

که در آن  $D_A$  اندازه بزرگترین ذره حاصل شده از عملیات سایش می‌باشد و توسط اندازه‌گیری توزیع ابعادی محصول عملیات سایش مشخص می‌شود.  $\lambda_A$  نیز شیب منحنی توزیع ابعادی در ناحیه محصول سایش می‌باشد (شیب منحنی سایش در سمت چپ شکل ۱) [۵].

### ۲-۱-۱-۲- نتایج حاصل از آزمون شکست سایشی

نمودار توزیع ابعادی محصول سایش نمونه‌های بار اولیه چغارت (نسبت به اندازه اولیه ذرات) که به وسیله آسیای گردان سایشی به دست آمده است، در شکل ۱ نشان داده شده است. مقدار  $t_a$  به حدود ۰/۶۱ به دست آمده است. بنابراین سنگ آهن چغارت در گروه سنگ‌های با سایش متوسط قرار می‌گیرد. مقدار  $D_A$  برابر با ۰/۴۷ میلی‌متر و مقدار  $\lambda_A$  نیز ۰/۳۷ محاسبه شد. در نهایت مدل تابع شکست برای محصول عملیات سایش به صورت زیر ارائه گردید:

$$A(x, D_A) = \left( \frac{x}{0.47} \right)^{0.37} \quad (3)$$



شکل ۱: نمودار محصول عملیات سایش در آسیای گردان آزمایشگاهی به مدت ده دقیقه

### ۲-۲- آزمون خودشکست

این آزمایش از سال ۱۹۹۲ میلادی در آزمایشگاه استرالیایی JKMRC، به عنوان یک روش استاندارد برای تعیین "ویژگی-های خودشکست" نمونه در سطوح انرژی متوسط تا بالا (یعنی شکست در اثر ضربه حاصل از خودشکست) در آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن به کار برده شده است. این آزمایش

در کاربردهای مربوط به مدلسازی آسیاکنی در آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن، بررسی مکانیزم‌های فوق ضروری می‌باشد. به این منظور آزمایش‌های خردایش برای بررسی مکانیزم‌های شکست در آسیای خودشکن، شامل ضربه، سایش و خودشکست، بر روی نمونه‌های بار ورودی به آسیای خودشکن سنگ آهن چغارت انجام شد.

در این تحقیق، ابتدا نمونه معرفی از خوراک آسیای خودشکن (از روی نوار نقاله) در مدار خردایش چغارت تهیه شد. حداقل ۱۰۰ کیلوگرم ماده معدنی برای انجام آزمایش‌ها مورد نیاز است. آماده‌سازی نمونه برای محدوده‌های ابعادی مشخص در انجام آزمایش‌ها صورت می‌گیرد.

### ۲-۱-۲- آزمون شکست سایشی

آزمون شکست سایشی یک آزمون شکست با انرژی کم می‌باشد که به وسیله آسیای سایش گردان آزمایشگاهی انجام می‌شود. این آسیا در آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه یزد ساخته شد. در آزمون سایش مربوط به استاندارد مرکز JKMRC، ۳ کیلوگرم از ذرات  $(-5\phi + 37/5)$  میلی‌متر به صورت خشک و با دقت  $(\pm 5)$  گرم تهیه شده، به مدت ۱۰ دقیقه در آسیای سایش گردان آزمایشگاهی  $305 \times 305$  میلی‌متری که دارای ۴ عدد بالابرنده به ارتفاع ۶/۳۸ میلی‌متر می‌باشد و در ۷۰٪ سرعت بحرانی، یعنی ۵۳ دور در دقیقه (rpm) می‌چرخد، خرد می‌شوند. محصول به دست آمده از آسیا با سرندهایی با نسبت  $\sqrt{2}$  و به صورت خشک تا ۳۸- میکرون دانه‌بندی شده و مقدار  $t_{10}$  آن تعیین می‌شود. میانگین هندسی اندازه اولیه ذرات،  $44/60$  میلی‌متر می‌باشد و اندازه  $t_{10}$  برابر  $44/60$  میلی‌متر به دست می‌آید.

$t_{10}$  به عنوان یک مشخصه خردایش در نظر گرفته می‌شود و به صورت درصد عبوری از روزه‌ای به اندازه یک دهم اندازه اولیه تعریف می‌شود [۶].

پارامتر سایش ( $t_a$ )، با معادله زیر تعریف می‌شود [۶]:

$$t_a = \frac{t_{10}}{10} \quad (1)$$

مقدار پارامتر  $t_a$  برای کانه‌های خیلی سخت، کم و در حدود ۰/۲ و برای کانه‌های خیلی نرم، بیشتر از ۲ می‌باشد.

$P_A$  معادل با کسری از ذرات است که به وسیله عملیات سایش به ابعاد ریزتر منتقل شده‌اند و معادل ۱۰ برابر  $t_a$  در نظر گرفته می‌شود.

تابع شکست برای محصول عملیات سایش می‌تواند توسط توزیع ابعادی محصول آزمایش سایش مشخص شود. این تابع

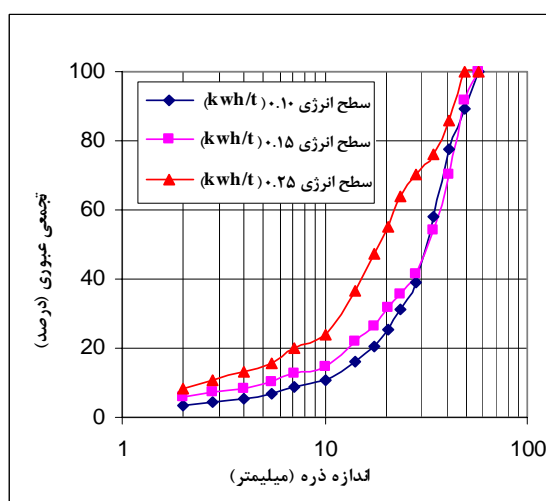
پس از برازش منحنی، به روش حداقل مربعات خطا، به داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، پارامترهای مشخص کننده شکست ( $A$  و  $b$  (t/kWh))، که تنها بستگی به نوع کانسنگ دارند، برآورد می‌گردند. مقادیر پارامترهای  $A$  و  $b$ ، مقاومت سنگ در برابر خودشکست را نشان می‌دهند. این مقادیر در سنگ‌های مقاوم در برابر ضربه ناشی از خودشکست، کمتر است.  $A$  ماکزیمم مقدار  $t_{10}$  به دست آمده است و پارامتر  $b$  شیب کلی منحنی در سطوح انرژی‌های پائین‌تر است (شکل ۷) [۶].

## ۲-۲-۱- نتایج حاصل از آزمون خودشکست

آزمایش‌ها طبق روش‌های استاندارد شرح داده شده در بالا، بر روی محدوده‌های مختلف ابعادی و در سطوح مختلف انرژی انجام گردید. پس از انجام آزمایش‌ها، نمودارهای توزیع ابعادی محصول شکست، یعنی درصد تجمعی عبور کرده از اندازه ذره اولیه، بر حسب میانگین هندسی محدوده‌های ابعادی مختلف رسم گردید. نتایج حاصل از آزمایش‌های وزنه افتان بر روی ۵ محدوده ابعادی و ۱۵ سطح انرژی، در شکل‌های ۲ تا ۶ آمده است.

جدول ۱: محدوده‌های ابعادی و سطوح انرژی ویژه خردایش (kWh/t) در آزمون خودشکست

شماره آزمایش	۶۳+۵۳ mm	۴۵+۳۷/۵ mm	۳۱/۵+۲۵ mm	۲۲/۴+۱۹ mm	۱۶+۱۲/۵ mm
۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲۵	۰/۵	۰/۲۵
۲	۰/۱۵	۰/۲۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۳	۰/۲۵	۰/۷۵	۲/۰	۲/۵	۲/۵



شکل ۲: توزیع ابعادی محصول شکست با ابعاد اولیه (۶۳+۵۳) میلی‌متر در سطوح مختلف انرژی

به وسیله دستگاه وزنه افتان انجام می‌شود که در آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه یزد ساخته شد. پارامترهای خودشکست (ثابت‌های  $A$  و  $b$  در رابطه ۵)، توسط این دستگاه تعیین می‌شوند. مقدار انرژی ویژه خردایش ( $E_{cs}$ ) به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{cs} = \frac{0.0272 M_d (h_i - h_f)}{m} \quad (4)$$

که در آن:  $E_{cs}$  انرژی ویژه خردایش (kWh/t)،  $M_d$  جرم وزنه افتان (kg)،  $\bar{m}$  متوسط جرم هر طبقه اندازه ذره (g)،  $h_i$  ارتفاع اولیه وزنه افتان تا بستر (Cm) و  $h_f$  ارتفاع نهایی وزنه افتان تا بستر (Cm) می‌باشد [۶].

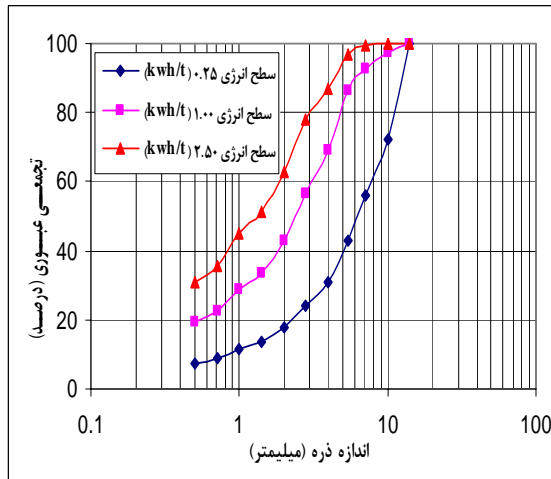
به منظور آزمایش یک نوع کانسنگ، مقدار ۱۰۰ کیلوگرم نمونه بر حسب طبقات سرندي  $\sqrt[4]{2}$  دانه‌بندی می‌شود. تعداد ۱۰ تا ۳۰ قطعه از سنگ معدنی (بسته به جرم ذره) در هر طبقه سرندي، برای انجام آزمایش در هر سطح انرژی لازم است. معمولاً تعداد ۱۵ ترکیب اندازه-انرژی (مانند جدول ۱) انتخاب می‌گردد. مقدار یا سطوح انرژی اولیه (داده شده) در هر آزمایش به گونه‌ای انتخاب می‌شود که با سختی کانسنگ تناسب داشته باشد. یک نمونه ۱۰۰ کیلوگرمی به ۵ محدوده ابعادی، مطابق جدول ۱ تقسیم می‌شود [۶].

محصولات شکست تمامی ذرات، برای هر ترکیب اندازه-انرژی، جمع‌آوری و اندازه آن‌ها تعیین می‌گردد. توزیع دانه‌بندی حاصل شده نسبت به اندازه ذره اولیه نرمال می‌شود. در بازه وسیعی از انرژی داده شده، برای اندازه‌های مختلف ذره و نوع کانسنگ، شکل توزیع‌های دانه‌بندی نسبی شبیه به یکدیگر است و می‌تواند تنها با یک نقطه روی توزیع مشخص گردد. مرسوم است از معیار درصد عبوری از یک دهم اندازه ذره اولیه، استفاده شود. این درصد با  $t_{10}$  مشخص می‌گردد. برای محدوده‌های ابعادی مختلف، اندازه اولیه ذره برابر با میانگین هندسی محدوده‌های ابعادی می‌باشد. به عنوان مثال میانگین هندسی ابعاد ذرات در محدوده ۶۳ تا ۵۳ میلی‌متر به صورت ریشه دوم حاصلضرب آن‌ها محاسبه می‌شود [۶].

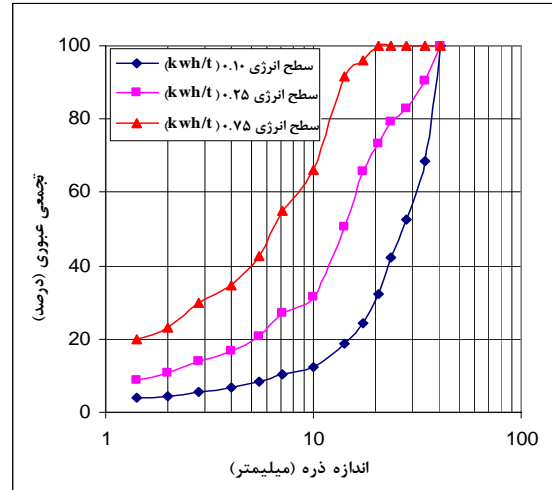
با روشی که شرح داده شد، مجموعه‌ای از مقادیر  $t_{10}$  و  $E_{cs}$  برای پانزده ترکیب اندازه-انرژی تولید می‌شود. مدل تجربی زیر ارتباط بین مقادیر شکست ( $t_{10}$ ) با انرژی ویژه خردایش ( $E_{cs}$ ) را به صورت نمائی بیان می‌کند:

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{cs}}) \quad (5)$$

که در آن:  $t_{10}$  درصد عبور کرده از یک دهم اندازه ذره اولیه (اندیس شکست) و  $E_{cs}$  انرژی ویژه خردایش (kWh/t) می‌باشد [۶].



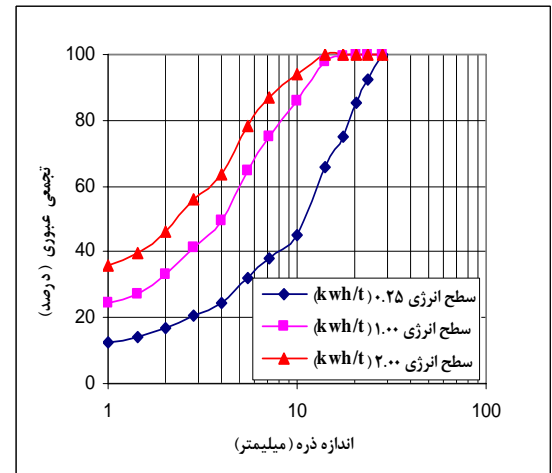
شکل ۶: توزیع ابعادی محصول شکست با ابعاد اولیه (۱۶+۱۲/۵) میلی‌متر در سطوح مختلف انرژی



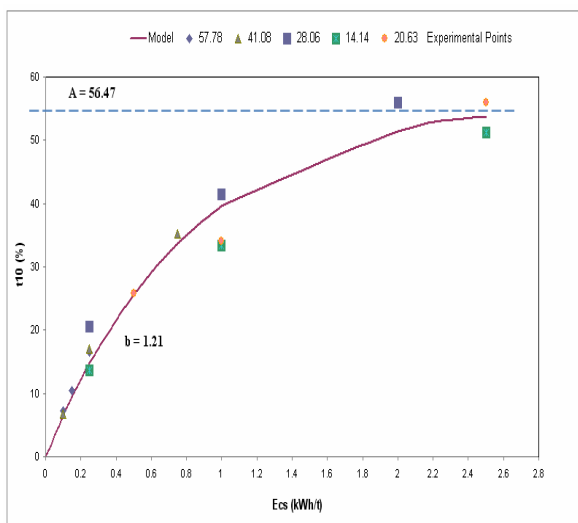
شکل ۳: توزیع ابعادی محصول شکست با ابعاد اولیه (۴۵+۳۷/۵) میلی‌متر در سطوح مختلف انرژی

پس از رسم نمودارهای توزیع ابعادی محصول شکست، مقادیر  $t_{10}$  از روی نمودارهای فوق به دست آمدند، سپس منحنی  $t_{10}-E_{cs}$  با بهترین برازش ممکن، مطابق نمودار شکل ۷ رسم گردید. آن گاه مقادیر  $A$  و  $b$  از روی نمودار شکل ۷ به دست آمد، که مقدار  $A$  برابر با  $۵۶/۴۷\%$  و مقدار  $b$  برابر با  $t/Kwh$  می‌باشد و در نهایت مدل خودشکنی (مدل خودشکست)  $۱/۲۱$  می‌باشد و در نهایت مقدار  $R^2$  (ضریب رگرسیون) برابر  $۰/۹۷$  که میزان بسیار مطلوبی است، به صورت زیر ارائه شد:

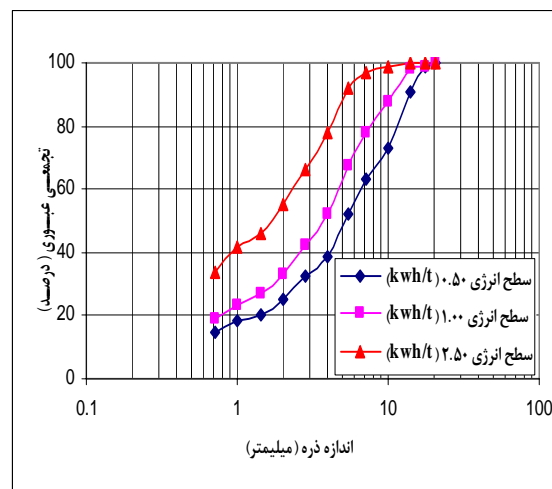
$$t_{10} = 56.47 \times (1 - e^{-(1.21 \times E_{cs})}) \quad (۶)$$



شکل ۴: توزیع ابعادی محصول شکست با ابعاد اولیه (۳۱/۵+۲۵) میلی‌متر در سطوح مختلف انرژی



شکل ۷: نتایج آزمایش سقوط وزنه، ارتباط اندیس شکست ( $t_{10}$ ) با انرژی ویژه خردایش ( $E_{cs}$ )



شکل ۵: توزیع ابعادی محصول شکست با ابعاد اولیه (۲۲/۴+۱۹) میلی‌متر در سطوح مختلف انرژی

مراحل تا زمانی که در حدود ۴۵ الی ۵۰ درصد مواد از سرنده اول عبور کند ادامه یافت.

جدول ۲: سرندهای مورد استفاده در انجام آزمایش شکست ضربه‌ای

شماره ردیف	اندازه سرنده (میکرون)
۱	۱۲۵۰۰
۲	۱۱۲۰۰
۳	۸۰۰۰
۴	۴۰۰۰
۵	۲۰۰۰
۶	۱۰۰۰
۷	۵۰۰
۸	۲۵۰
۹	۱۲۵

### ۲-۳-۱- مدل تابع شکست ضربه‌ای

پس از انجام آزمایش‌ها، برای محاسبه تابع شکست و تابع انتخاب، از نرم‌افزار BFDS (نرم‌افزار تعیین تابع شکست) استفاده گردید. این نرم‌افزار به زبان برنامه نویسی دلفی نگارش ۶ نوشته شده و در محیط ویندوز اجرا می‌گردد [۱۶]. با وارد کردن داده‌ها در نرم‌افزار BFDS و پردازش آن، مقادیر تابع شکست و تابع انتخاب به دست آمد. یکی از معادلات پرکاربرد که مبتنی بر محاسبات برگشتی است و برای بیان تابع شکست به کار می‌رود، رابطه‌ای است که به مدل برادبنت و کالکات (B&C) معروف است [۱]. در این روش، داده‌های خردایش به دست آمده و یک جستجوی عددی برای محاسبه یک تابع شکست که برازنده این داده‌ها باشد انجام می‌شود. این مدل که در نرم‌افزار BFDS موجود است، برای توابع قابل نرمال شدن پیشنهاد شده است. اگر مقادیر تابع شکست مستقل از اندازه اولیه باشد، آن را قابل نرمال شدن می‌نامند. برای اکثر کانه‌ها، تابع شکست به صورت غیر نرمال است. این مدل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$B(x, y) = \phi \left(\frac{x}{y}\right)^\gamma + (1 - \phi) \left(\frac{x}{y}\right)^\beta \quad (7)$$

که در آن:  $x$  و  $y$  به ترتیب اندازه محصول و اندازه اولیه می‌باشند.  $\phi$ ،  $\gamma$  و  $\beta$  پارامترهای مدل می‌باشند. اگر برای یک سری از مقادیر  $B(x, y)$ ، مقادیر  $\phi$ ،  $\gamma$  و  $\beta$  تعیین شوند، با استفاده از رابطه ۷، برای هر اندازه  $x$  می‌توان تابع شکست آن را محاسبه کرد. اگر داده‌های حاصل از آزمایش غیر نرمال باشند (که اکثراً نیز غیر نرمال هستند)، مقدار  $\Phi$  باید به عنوان تابعی از ابعاد اولیه تعیین شود. معمولاً این اثر با استفاده از یک تابع ساده توانی معکوس مدل می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود:

منحنی  $t_{10}-E_{cs}$  با شیب تندتر، بیان کننده یک کانه نرم‌تر می‌باشد. برای یک مقدار ثابت  $A$ ، شیب تندتر به معنای یک مقدار بزرگ‌تر  $b$  می‌باشد. برای اکثر کانه‌های سخت، مقدار  $A$  در حدود ۵۰ می‌باشد. پارامتر  $t_{10}$  می‌تواند به عنوان اندیس نرمی تفسیر شود، به طوری که مقادیر بزرگ‌تر  $t_{10}$ ، بیان کننده توزیع ابعادی یک محصول نرم‌تر است. مقدار پارامتر  $A$ ، مقدار حدی  $t_{10}$  می‌باشد. این مقدار حدی بیان می‌کند که در انرژی‌های بیشتر، خردایش بیشتر به مقدار کمی صورت می‌گیرد، یعنی با افزایش  $E_{cs}$ ، فرآیند خردایش کمتر مؤثر واقع می‌شود [۶].

### ۲-۳-۲- آزمون شکست ضربه‌ای

تابع شکست و تابع انتخاب برای حالت شکست ضربه‌ای، با استفاده از مدلی مشابه آسیای گلوله‌ای مدلسازی می‌شود. ذراتی که تقریباً ریزتر از ۱۲/۵ میلی‌متر هستند، نرخ ویژه شکست مربوط به مکانیزم خودشکست آنها ناچیز و قابل صرف نظر کردن می‌باشد. مکانیزم شکست غالب در این محدوده ابعادی، شکست ضربه‌ای است. برای مدلسازی، نیاز به محاسبه پارامترهای تابع شکست و تابع انتخاب می‌باشد. آسیای مورد استفاده برای انجام این آزمایش، آسیای گلوله‌ای استاندارد آزمایشگاهی است [۵].

برای این منظور، ابتدا اقدام به نمونه‌برداری از خوراک آسیای خودشکن در مدار خردایش سنگ آهن چغارت شد. ذرات ریزتر از ۱۲/۵ میلی‌متر برای انجام این آزمایش جدا و نمونه معرف تهیه شد. جهت به دست آوردن توابع شکست و انتخاب، نیاز به انجام آزمایش‌های خردایش بر روی این محدوده ابعادی بود. این آزمایش‌ها باید به طور دقیق، با زمان‌های خردایش مشخص و آنالیز سرنده انجام می‌شد. آزمایش‌ها بر روی ذرات تک سایز شده نمونه معرف انجام می‌گیرد. نمونه معرف، با استفاده از سرندهایی که در جدول ۲ آمده است، تک سایز شد و از هر محدوده، ۳۵۰ گرم نمونه برای انجام آزمایش‌ها آماده شد. پس از تک سایز نمودن نمونه، بار (تک سایز شده) مربوط به هر طبقه سرنده را داخل آسیا (آزمایشگاهی) ریخته و آسیا شروع به کار نمود. عملیات آسیا کردن به طریقه خشک انجام شد. پس از زمان مشخصی (که در اینجا، زمان با توجه به اندیس کار و سختی ماده معدنی و به صورت تجربی، ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد)، آسیا را خاموش نموده و کل نمونه از آن خارج و سرنده گردید. پس از این مرحله، مواد باقیمانده بر روی هر سرنده به صورت جداگانه توزین شد. سپس تمام مواد مجدداً در داخل آسیا قرار گرفته و مراحل قبلی صورت پذیرفت. این

به منظور تعیین پارامترهای مدل فوق از روی نمودار، می‌توان به صورت زیر عمل نمود [۵]:

۱- قسمت اولیه منحنی داده‌ها که از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده و به صورت خط راستی می‌باشد را ادامه داده به طوری که مطابق نمودار فوق، خط A با معادله زیر حاصل می‌شود:

$$k = S_1 d_p^\alpha \quad (11)$$

۲- مقدار  $S_1$  از محل تقاطع خط راست حاصل شده با خط قائمی که از نقطه  $d_p=1\text{mm}$  می‌گذرد، به دست می‌آید.  $\alpha$  معادل با شیب خط راست به دست آمده، می‌باشد.  $S_1$  به عنوان تابع انتخاب در ۱ میلی‌متر نامیده شده و واحد آن  $\text{min}^{-1}$  است.

۳- با تعیین نسبت‌هایی مانند  $c/d$ ، در تعدادی از ابعاد ذرات از روی نمودار فوق، چندین مقدار برای عبارت  $(k(d_p)/S_1 d_p^\alpha)$  به دست می‌آید. با رسم مقدار عبارت  $1 - (S_1 d_p^\alpha / k(d_p))$  برحسب ابعاد ذره، همچنان که در نمودار نشان داده شده است، خط C حاصل می‌شود. شیب خط به دست آمده، معادل با  $\lambda$  می‌باشد. طبق معادله زیر:

$$\frac{S_1 d_p^\alpha}{k(d_p)} - 1 = \left(\frac{d_p}{\mu}\right)^\lambda \quad (12)$$

۴- برای تعیین پارامتر  $\mu$ ، خط B موازی با خط A به گونه‌ای رسم می‌شود که از یک نقطه مانند  $f$  که دارای عرضی معادل با  $0.5e$  می‌باشد، عبور کند. این خط، منحنی داده‌ها را در نقطه‌ای که دارای عرضی با مقدار  $\mu$  می‌باشد، قطع می‌کند.

### ۲-۳-۳-۳ نتایج حاصل از آزمون شکست ضربه‌ای

با وارد کردن داده‌های حاصل از آزمایش در نرم‌افزار BFDS، مدل مربوط به تابع شکست، با استفاده از رابطه برادبنت و کالکات، به صورت زیر به دست آمد:

$$B(x, y) = 0.60 \left(\frac{x}{y}\right)^{0.463} + (0.40) \left(\frac{x}{y}\right)^{5.732} \quad (13)$$

همچنان که قبلاً نیز گفته شد، اگر داده‌های حاصل از آزمایش غیر نرمال باشند (که معمولاً نیز غیر نرمال هستند)، مقدار  $\Phi$  باید به عنوان تابعی از ابعاد اولیه تعیین شود. بنابراین مدل زیر به دست آمد:

$$\phi(y) = 0.436 \left(\frac{y}{5\text{mm}}\right)^{-0.178} \quad (14)$$

با پردازش داده‌ها توسط نرم‌افزار BFDS، مقادیر تابع انتخاب برای محدوده‌های ابعادی مختلف به دست آمد که نمودار مربوط به آن در شکل ۹ آورده شده است. ماکزیمم مقدار تابع

$$\phi(y) = \phi_0 \left(\frac{y}{y_0}\right)^{-\delta} \quad (8)$$

در رابطه ۸،  $\phi_0$  و  $\delta$  پارامترهای مدل می‌باشند. مقدار  $y_0$  که به عنوان ابعاد اولیه مرجع است، معمولاً ۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود و بنابراین، مدل ۸ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\phi(y) = \phi_s \left(\frac{y}{5\text{mm}}\right)^{-\delta} \quad (9)$$

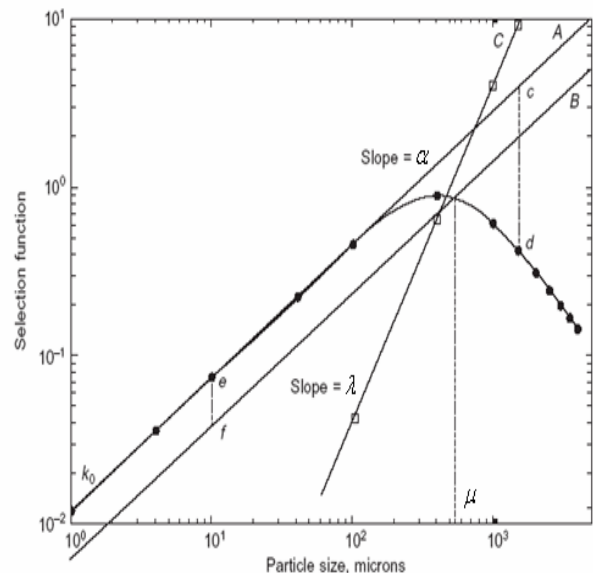
اگر تابع شکست نرمال باشد، مقدار پارامتر  $\delta$  در رابطه ۹ برابر با صفر می‌باشد [۵].

### ۲-۳-۲ مدل تابع انتخاب ضربه‌ای

مدلی که برای بیان تابع انتخاب به کار می‌رود، مدلی است که توسط آستین<sup>۵</sup> پیشنهاد شده است [۵]. این مدل بیان می‌کند که مقدار تابع انتخاب تا یک محدوده ابعادی افزایش و پس از آن تابع انتخاب کاهش می‌یابد. در واقع آستین، تغییر نرخ ویژه شکست با اندازه ذره را به صورت تابع زیر ارائه می‌کند:

$$k(d_p) = \frac{S_1 d_p^\alpha}{1 + (d_p / \mu)^\lambda} \quad (10)$$

معمولاً در رابطه فوق، اندازه ذره را برحسب میلی‌متر و نرخ ویژه شکست برحسب یک بر دقیقه ( $\text{min}^{-1}$ ) تعیین می‌شود. پارامترهای این تابع را می‌توان به نمودار شکل ۸ که نرخ ویژه شکست  $k(d_p)$  را برحسب ابعاد ذره ( $d_p$ ) رسم کرده است، مرتبط کرد [۵].



شکل ۸: نمودار تابع انتخاب  $k(d_p)$  بر حسب ابعاد ذره ( $d_p$ ) به منظور تعیین پارامترهای تابع انتخاب در مدل آستین [۵]

دست می‌آیند. پارامترهای مربوط به مدل تابع انتخاب، شامل مقدار تابع انتخاب در اندازه ۱ میلی‌متر ( $S_1$ ) برحسب یک بر دقیقه ( $1/\text{min}$ )،  $\alpha$ ،  $\mu$  برحسب میلی‌متر و  $\lambda$  می‌باشد. پارامترهای مربوط به مدل تابع شکست، شامل  $\beta$ ،  $\gamma$ ،  $\delta$  و مقدار  $\phi$  در اندازه مرجع ۵ میلی‌متر ( $\phi_5$ ) می‌باشد.

#### ۴-۲- پارامترهای مربوط به مدل خودشکست

این مدل شامل دو پارامتر A برحسب درصد و b برحسب تن بر کیلووات ساعت (t/kwh) می‌باشد که از آزمایش با وزنه افتان به دست می‌آیند.

#### ۴-۳- پارامترهای مربوط به مدل شکست سایشی

این پارامترها، شامل دو پارامتر سایش  $t_a$  و بزرگ‌ترین ابعاد ذره حاصل شده از محصولات سایش برحسب میلی‌متر است که از آزمایش با آسیای سایش به دست می‌آیند.

#### ۴-۴- زمان ماند متوسط

در سیستم‌های ناپیوسته و یا بسته، تمامی ذرات (مولکول‌ها، بلورها، دانه‌ها و یا مجموعه ذرات) دارای زمان واکنش و یا زمان انتقال معادلی می‌باشند و یا به عبارتی دیگر، برای مدت زمان یکسانی تحت واکنش قرار می‌گیرند که این زمان را زمان ماند متوسط (MRT) می‌گویند که به صورت حجم ظرف واکنش (حجم پالپ داخل آسیا) تقسیم بر دبی حجمی جریان خروجی تعریف می‌شود. در این تعریف، حجم پالپ داخل آسیا برحسب متر مکعب ( $\text{m}^3$ )، دبی حجمی جریان خروجی برحسب متر مکعب بر ساعت ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) و بنابراین زمان ماند میانگین برحسب ساعت (h) به دست می‌آید.

برای تعیین میزان پرشدگی آسیا، با یک توقف ناگهانی<sup>۸</sup> و انجام عملیات فلاشینگ، به داخل آسیا رفته و میزان پرشدگی آن تعیین و با توجه به درصد وزنی جامد و دبی حجمی جریان خروجی، زمان ماند میانگین برابر با ۹/۱۱ دقیقه به دست آمد.

#### ۴-۵- پارامترهای هندسی آسیای شبیه‌سازی شده و آسیای آزمایشگاهی

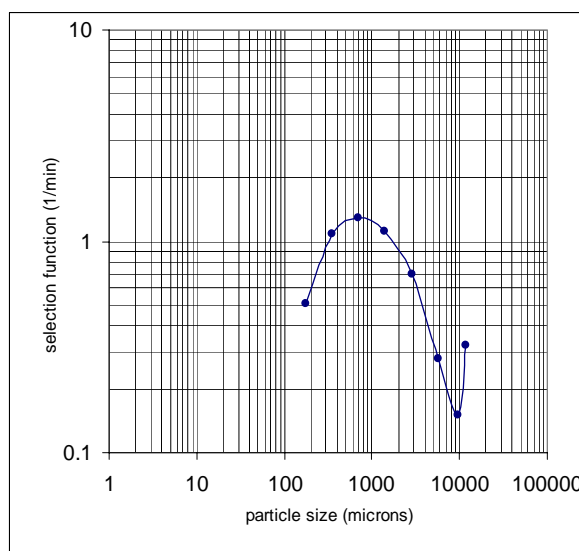
##### ۴-۵-۱- ابعاد (داخلی) آسیای شبیه‌سازی شده

- قطر آسیا: ۷/۷۶ متر
- طول خط مرکزی: ۳/۹۵ متر
- طول قسمت استوانه‌ای: ۳/۵۰ متر
- قطر ترانینون: ۲ متر
- حجم بار: ۳۳/۸۲٪
- حجم گلوله: ٪۰
- قطر گلوله (میلی‌متر): ۰
- سرعت آسیا نسبت به سرعت بحرانی: ٪۷۵

انتخاب، برابر با  $1/30 \text{ min}^{-1}$  و مربوط به محدوده ابعادی ۱۰۰۰+۵۰۰ میکرون می‌باشد.

در نهایت با استفاده از نمودار شکل ۹، مدل تابع انتخاب آستین به صورت زیر به دست آمد:

$$k(d_p) = \frac{3.6 d_p^{1.16}}{1 + (d_p / 0.7)^{2.1}} \quad (15)$$



شکل ۹: نمودار تابع انتخاب بر حسب ابعاد ذره

#### ۳- آشنایی با نرم‌افزار MODSIM

نرم‌افزار مدسیم، نرم‌افزار شبیه‌سازی مدارهای کانه‌آرایی است که در سال ۱۹۷۲ میلادی توسط کینگ و فورد<sup>۹</sup> به زبان برنامه‌نویسی فرترن<sup>۷</sup> نوشته شد. این نرم‌افزار، رفتار واحدهای قرار داده شده در فلوشیت را با استفاده از مدل‌هایی که برای آن تعریف شده است، شبیه‌سازی کرده و موازنه جرم را نیز به طور دقیق اجرا می‌کند. مدار اصلی، برای مدل‌های استفاده شده در نرم‌افزار مدسیم، از روش موازنه جمعیتی استفاده می‌کند و یک شبیه‌ساز حالت پایا می‌باشد. پس از وارد کردن اطلاعات، با اجرای عملیات شبیه‌سازی، خروجی‌های شبیه‌سازی شده در اختیار کاربر قرار می‌گیرند.

#### ۴- پارامترهای مورد نیاز در انجام شبیه‌سازی

پارامترهای مورد استفاده در انجام شبیه‌سازی با استفاده از مدل مربوط به آسیاهای خودشکن (و نیمه خودشکن) عبارتند از:

##### ۴-۱- پارامترهای مربوط به مدل شکست ضربه‌ای

این پارامترها، شامل پارامترهای مدل تابع انتخاب و تابع شکست می‌باشند که از آزمایش با آسیای گلوله‌ای استاندارد به



جدول ۳: مقادیر پارامترهایی که انرژی ویژه متوسط شکست ذره را با ابعاد ذره برای تعدادی از کانی‌های رایج مرتبط می‌کند. [۵]

محدوده ابعادی (mm)	$\phi$	$d_{p0}$ (mm)	$E_{\infty}$ (J/Kg)	کانی
۰/۲۵-۸/۰۰	۱/۶۲	۱۹/۳	۱/۰۵	آپاتیت
۰/۷۰-۷/۶۰	۱/۰۳	۷/۳۱	۳/۱۹	گالن
۱/۱۸-۱۰/۰	۱/۶۰	۷/۰۳	۵/۵۰	گیلسونیت
۰/۲۵-۴/۷۵	۱/۶۱	۳/۴۸	۴۳/۴	کوارتز
۰/۳۵-۱۰/۰	۱/۱۶	۸/۲۴	۷/۰۰	اسفالریت
۰/۲۵-۷/۲۰	۱/۹۶	۳/۹۳	۹/۵۶	منیتیت
۰/۲۵-۱۵/۸	۱/۲۶	۱/۱۷	۹۶/۱	کانسنگ مس
۰/۲۵-۱۵/۰	۲/۳۰	۱/۰۸	۴۷/۳	کانسنگ آهن
۰/۳۵-۵/۶	۲/۰۵	۰/۴۹۰	۱۱۴/۲	آهک
۰/۵۰-۱۵/۰	۲/۶۶	۰/۸۸۲	۴۵/۹	مرمر
۰/۳۵-۶/۰۰	۱/۴۲	۰/۸۰۳	۲۳۵/۹	تاکونیت
۰/۳۵-۱۰/۰	۱/۷۶	۰/۸۵۶	۱۶۳/۳	تاکونیت

#### ۴-۷- توزیع‌های دانه‌بندی جریان‌ها

از دیگر ورودی‌های مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی با کمک این نرم‌افزار، توزیع‌های دانه‌بندی جریان‌های خوراک، محصول و داخلی، دبی شاخه‌های خوراک (بر حسب تن بر ساعت) و درصد جامد در شاخه‌های مختلف می‌باشد.

#### ۵- شبیه‌سازی مدار خردایش کارخانه فرآوری سنگ

##### آهن چغارت توسط نرم‌افزار MODSIM

در شکل ۱۰، فلوشیت بخشی از مدار کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت که در حال کار می‌باشد، ارائه شده است. اطلاعات این مدار، با استفاده از داده‌های کارخانه در حال کار می‌باشد که توسط نرم‌افزار MODSIM مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.

کانسنگ آهن استخراج شده، پس از خردایش توسط سنگ-شکن فکی به محوط انباشت و برداشت جهت اختلاط و همگن‌سازی مواد منتقل می‌شود. پس از آن برای خردایش بیشتر به آسیای خودشکن خوراک‌دهی می‌شود. آسیای خودشکن خط چغارت در مدار بسته با یک دستگاه سرنده ارتعاشی قرار دارد. سرنده سرنده به عنوان بار در گردش به آسیا برگشت داده شده و ته‌ریز آن جهت پرعیارسازی به جداکننده‌های مغناطیسی با شدت پائین و بالا فرستاده می‌شود. محصول این بخش از خط به عنوان کنسانتره آهن جهت آبدگیری به بخش فیلتراسیون منتقل می‌گردد. محصول پرعیار شده به صنایع فولاد سازی ارسال می‌گردد [۳].

- ابعاد شبکه: ۲۹ میلی‌متر

#### ۴-۵-۲- ابعاد (داخلی) آسیای آزمایشگاهی

- قطر آسیا: ۰/۳۰۵ متر

- حجم بار: ۸/۵۰

- سرعت آسیا نسبت به سرعت بحرانی: ۷۵٪

- قطر گلوله: ۲۶ میلی‌متر

#### ۴-۶- پارامترهای مربوط به انرژی مورد نیاز برای شکست ذره

این مدل، انرژی ویژه متوسط شکست ذره را به دست می‌دهد. ارتباط بین انرژی ویژه متوسط شکست ذره ( $E_{50}$ ) بر حسب ژول بر کیلوگرم (J/kg) با ابعاد ذره ( $d_p$ ) بر حسب میلی‌متر (mm) به صورت زیر بیان می‌شود [۵]:

$$E_{50} = E_{\infty} \left(1 + \frac{d_{p0}}{d_p - d_{p \min}}\right) \phi \quad (16)$$

$E_{\infty}$  انرژی ویژه متوسط شکست برای ذرات با ابعاد بزرگ، معمولاً در حدود ۱ سانتی‌متر یا بیشتر می‌باشد.

پارامترهای  $d_{p0}$  (ابعاد مرجع) و  $\phi$ ، ویژه مواد هستند و برای تعدادی از کانی‌های رایج، اندازه‌گیری و در جدول ۳ آورده شده‌اند.

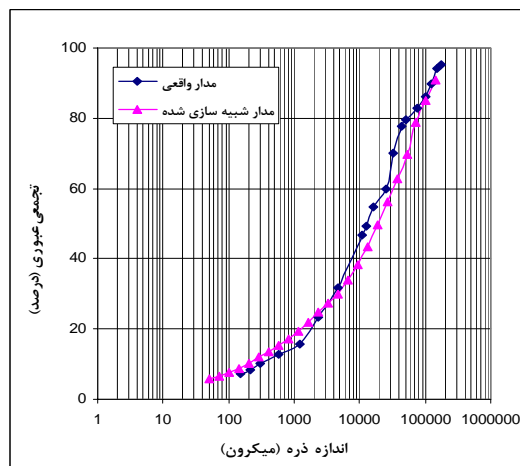
$d_{p \min}$  حد پائین شکست شکننده می‌باشد. به عبارتی دیگر، ذرات کوچک‌تر از  $d_{p \min}$  در حین ضربه، تغییر شکل داده و دچار شکست نمی‌شوند. به عنوان مثال، این حد برای کانی کوارتز در حدود ۰/۳ میکرون است که با توجه به مقدار بسیار کم این پارامتر، از آن صرف نظر کرده و بنابراین رابطه فوق به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E_{50} = E_{\infty} \left(1 + \frac{d_{p0}}{d_p}\right) \phi \quad (17)$$

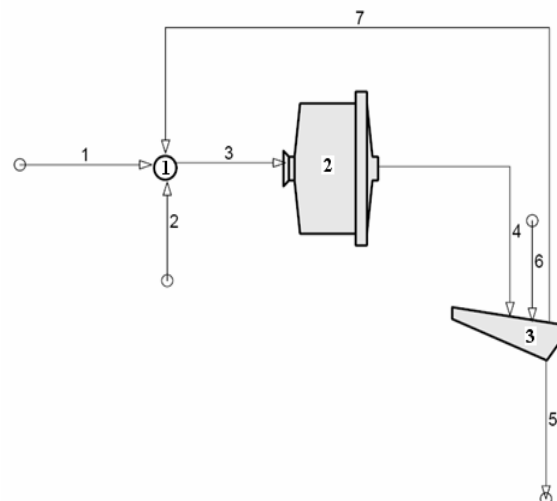
معادله فوق، این حقیقت را بیان می‌کند که انرژی ویژه متوسط شکست اندازه‌گیری شده برای ذرات بزرگ‌تر از چند میلی‌متر، مستقل از ابعاد ذرات است، اما هنگامی که ابعاد ذره تقریباً به زیر ۱ میلی‌متر کاهش می‌یابد، نسبتاً به تندی افزایش می‌یابد [۵].

از آنجایی که باید در نرم‌افزار MODSIM، مقادیر  $d_{p0}$ ،  $E_{\infty}$  و  $\phi$  را وارد نمود، بنابراین با توجه به جدول ۳، شکل کلی معادله برای کانه آهن به صورت زیر به دست می‌آید:

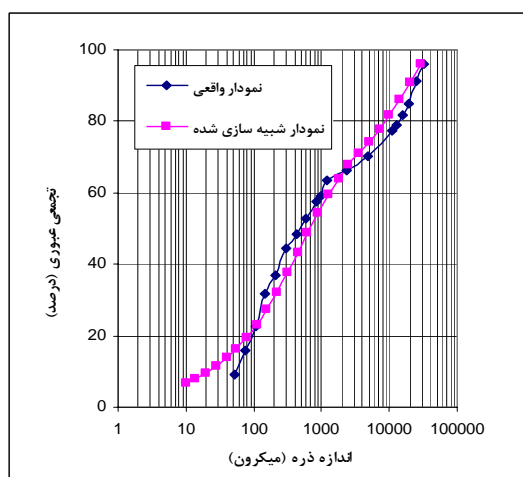
$$E_{50} = 47.3 \left(1 + \frac{1.08}{d_p}\right)^{2.30} \quad (18)$$



شکل ۱۲: مقایسه دانه‌بندی خوراک آسیای خودشکن مدار واقعی و شبیه‌سازی شده

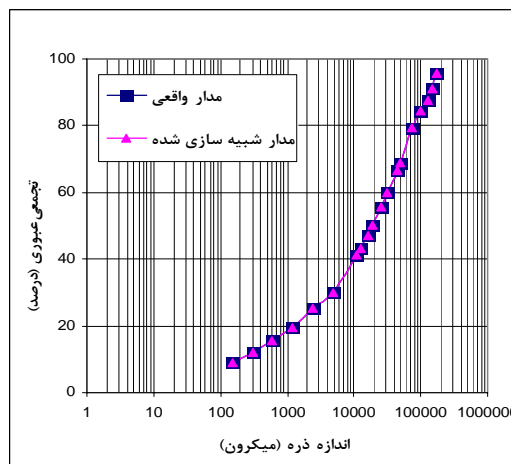


شکل ۱۰: فلوشیت مدار شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار MODSIM

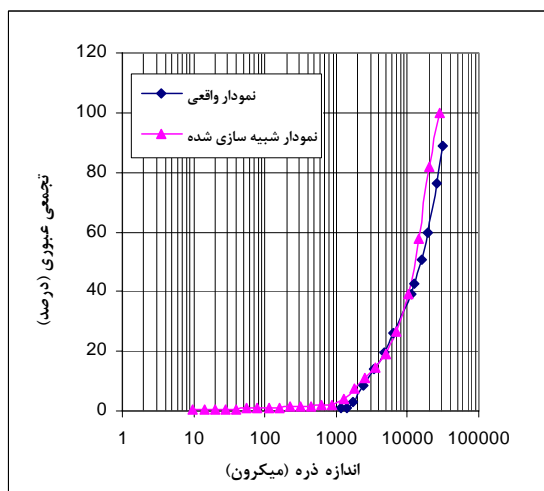


شکل ۱۳: مقایسه دانه‌بندی خروجی آسیای خودشکن مدار واقعی و شبیه‌سازی شده

داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌های مختلف و دیگر اطلاعاتی که از کارخانه در حال کار به دست آمد، به عنوان داده‌های ورودی مورد نیاز، وارد نرم‌افزار شدند. پس از انجام شبیه‌سازی، نمودارهای شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ که توسط نرم‌افزار MODSIM رسم شده است، به دست آمد که مربوط به نتایج آنالیز سرندهی مدار واقعی (اصلی) و مدار شبیه‌سازی شده در بخش‌های خوراک اولیه (خوراک تازه به آسیای خودشکن)، خروجی آسیای خودشکن، بار درگردش، زیرسرندهی و ترکیب بار درگردش به علاوه خوراک تازه می‌باشد.



شکل ۱۱: مقایسه دانه‌بندی خوراک اولیه مدار واقعی و شبیه‌سازی شده



شکل ۱۴: مقایسه دانه‌بندی بار درگردش آسیای خودشکن مدار واقعی و شبیه‌سازی شده

معدنی را به خود اختصاص می‌دهند. از آن جایی که بیشترین هزینه کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی مربوط به توان مصرفی آسیاها می‌باشد، از این رو توان‌کشی یکی از مهم‌ترین عوامل در طراحی و همچنین بهینه‌سازی کارخانه‌های آسیاکنی است. بر این اساس روشی که بتواند میزان توان آسیا را پیش‌بینی نماید، برای طراحان و گردانندگان کارخانه بسیار قابل اهمیت است. یکی از ابزارهای مورد استفاده در این مورد، ابزار شبیه‌سازی می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی توان مصرفی با استفاده از نرم‌افزار MODSIM که شامل توان خالص، توان بدون بار و توان ناخالص که مجموع توان خالص و توان بدون بار می‌باشد در جدول ۵ آورده شده است.

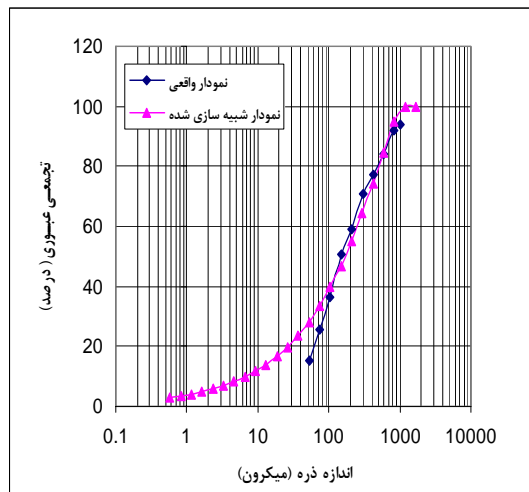
جدول ۵: نتایج حاصل از شبیه‌سازی توان مصرفی توسط نرم‌افزار

#### MODSIM

توان ناخالص (kw)	توان بدون بار (kw)	توان خالص (kw)	توان شبیه‌سازی شده
بدون شارژ گلوله	۳۱۱۴/۰۰	۲۵۵/۹۵	۳۳۶۹/۹۵
شارژ ۷٪ گلوله	۳۶۸۵/۱۴	۲۵۵/۹۵	۳۹۴۱/۰۹
توان واقعی	-	-	۳۳۶۲/۰۰

همان‌طور که از جدول ۵ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از توان مصرفی نیز، در مدار واقعی و مدار شبیه‌سازی شده، تقریباً نزدیک به هم بوده و صحت شبیه‌سازی توان مصرفی را نیز تأیید می‌کند.

کارایی سرنده ارتعاشی کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت، مناسب و بالاست، اما با توجه به قطر زیاد ذرات در خوراک جداکننده‌های مغناطیسی که موجب هدر رفتن آهن در ذرات دانه درشت و انتقال آن به باطله و کاهش بازیابی می‌شود و از سویی باعث کاهش عیار آهن (Fe) و افزایش فسفر (P) می‌شود، با انجام شبیه‌سازی در حالات مختلف شارژ گلوله و ابعاد مختلف چشمه‌های سرنده، نتایجی در مورد میزان شارژ گلوله و تغییر ابعاد چشمه‌های سرنده دست آمد. مشخص شد که در صورت کاهش ابعاد چشمه‌های سرنده از ۱ میلی‌متر به ۰/۷ میلی‌متر و با شارژ ۷ درصدی گلوله‌های ۱۰۰ میلی‌متری، می‌توان ضمن حفظ تناژ بار در گردش و کنترل حداکثر توانی که آسیا می‌کشد، ابعاد محصول را از ۴۸۱ میکرون به ۱۶۴ میکرون کاهش داد. نمودارهای دانه‌بندی محصول (زیرسرنده)، نتایج موازنه مدار و توان شبیه‌سازی شده در حالت شارژ ۷٪ گلوله، در شکل ۱۶ و جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.



شکل ۱۵: مقایسه دانه‌بندی زیرسرنده آسیای خودشکن مدار واقعی و شبیه‌سازی شده

همان‌گونه که در نمودار شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، انطباق کامل نقاط مدار واقعی و مدار شبیه‌سازی شده، نشان دهنده یکسان بودن دانه‌بندی خوراک اولیه مورد استفاده در هر دو حالت (مدار واقعی و مدار شبیه‌سازی شده) است. اما به طور کلی، آن‌چنان‌که در نمودارهای شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ مشاهده می‌شود، روند نمودارها در مدار واقعی و مدار شبیه‌سازی شده، یکسان و تقریباً "نزدیک به هم می‌باشند، که دلالت بر صحت شبیه‌سازی انجام شده، دارد. در جدول ۴ نیز، نتایج موازنه مدار حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده است. این نتایج نیز، صحت شبیه‌سازی انجام شده بر روی مدار خردایش کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت را تأیید می‌کند.

جدول ۴: نتایج موازنه مدار حاصل از شبیه‌سازی در حالت‌های بدون شارژ و شارژ ۷ درصد گلوله

نام جریان (شماره جریان)	حالت بدون شارژ گلوله		حالت شارژ ۷ درصد گلوله	
	میزان جامد (%)	نرخ جامد (t/h)	میزان جامد (%)	نرخ جامد (t/h)
خوراک تازه (۱)	۹۸/۰۰	۲۹۴/۰۱	۹۸/۰۰	۲۹۴/۰۱
خوراک آسیا (۳)	۶۴/۹۷	۴۳۵/۹۶	۶۴/۴۱	۴۲۴/۰۸
خروجی آسیا (۴)	۶۴/۹۷	۴۳۵/۹۶	۶۴/۴۱	۴۲۴/۰۸
زیرسرنده (۵)	۳۹/۷۳	۲۹۴/۰۱	۳۹/۷۳	۲۹۴/۰۱
روسرنده (۷)	۹۴/۰۰	۱۴۲/۰۹	۱۳۰/۱۴	۲۹۴/۰۱

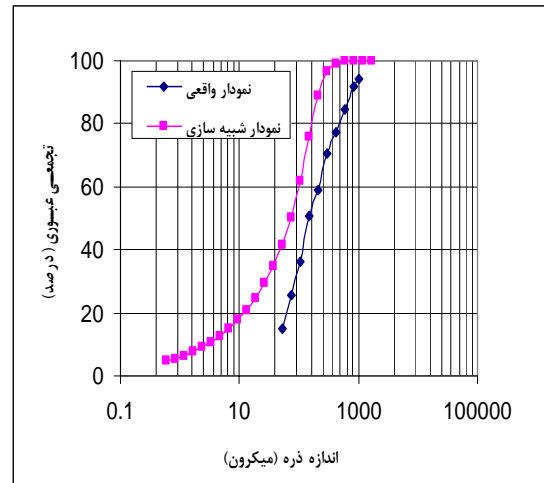
یکی دیگر از عواملی که به صورت همزمان با نتایج فوق باید مورد توجه قرار گیرد، مسئله توان‌کشی آسیاها می‌باشد که بیش از نیمی از هزینه‌های عملیاتی کارخانه‌های فرآوری مواد

## ۷- تشکر و قدردانی

از مدیریت محترم شرکت سنگ آهن مرکزی ایران، سرپرست محترم کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت و مدیر پژوهشی شرکت که امکان انجام این طرح تحقیقاتی را فراهم نمودند، همچنین کارشناسان و پرسنل کارخانه که بدون مساعدت آنها انجام این طرح ممکن نبود، تقدیر و سپاسگزاری می‌شود.

## ۸- منابع

- [1] Austin L. G., 1984, "Process Engineering of Size Reduction, Ball Milling", the Pennsylvania State University, USA.
- [2] Gupta A. and Yan D. S., 2006, "Mineral Processing Design and Operation, An Introduction", Australia.
- [3] "Technical Operation Manual for Choghart Production Line", 1999, Volume 1 of 2.
- [4] King R. P., 2004, "MODSIM, MODular SIMulator for Mineral Processing Plants, User Manual", Version 3. 6. 14, MTI, USA.
- [5] King R. P., 2001, "Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems", Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, USA.
- [6] Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T., 1996, "Mineral Comminution Circuits, Their Operation and Optimization", JKRC, Australia.
- [7] Genc O., Ergun L., Benzer H., 2004, "Single Particle Impact Breakage Characterization of Materials by Drop Weight Testing", Department of Mining Engineering, Ankara, Turkey.
- [8] JKRC, 2001, "JKSimMet, Steady State Mineral Processing Simulator, User Manual", Version 5.1, Australia.
- [9] Lynch A. J., 1977, "Mineral Crushing and Grinding Circuits, Their Simulation, Design and Control", Elsevier Science Publishers.
- [10] Meier M., John E., Wieckhusen D., Wirth W., Peukert W., 2009, "Generally Applicable Breakage Functions Derived from Single Particle Comminution Data", Elsevier.



شکل ۱۶: مقایسه دانه‌بندی زیرسرد آسیای خودشکن مدار واقعی و شبیه‌سازی شده در حالت شارژ ۷ درصد گلوله و  $d_{80} = 164$  میکرون

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور بهینه‌سازی عملکرد آسیای خودشکن چغارت، از نرم‌افزار شبیه‌سازی MODSIM استفاده گردید. هدف از ابزار شبیه‌سازی در مدار خردایش فعلی کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت، بررسی امکان بهینه‌سازی آسیای خودشکن آن می‌باشد. شبیه‌سازی به کمک این نرم‌افزار، مستلزم شناخت دقیق مدل‌ها و تعیین پارامترهای آن می‌باشد. در این ارتباط لازم بود تا برخی از پارامترهای مورد نیاز این نرم‌افزار شامل پارامترهای مربوط به مدل شکست ضربه‌ای، مدل خودشکست، مدل شکست سایشی، زمان ماند متوسط، پارامترهای هندسی آسیای شبیه‌سازی شده، آسیای آزمایشگاهی و پارامترهای مربوط به انرژی مورد نیاز برای شکست ذره محاسبه شوند. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های کارخانه، صحت شبیه‌سازی انجام شده بر روی آسیای خودشکن و سرد ارتعاشی کارخانه فرآوری چغارت را تأیید می‌کند.

با انجام شبیه‌سازی در حالات مختلف شارژ گلوله و ابعاد مختلف چشمه‌های سرد، نتایجی در مورد میزان شارژ گلوله و تغییر ابعاد چشمه‌های سرد دست آمد. مشخص شد که در صورت کاهش ابعاد چشمه‌های سرد از ۱ میلی‌متر به ۰/۷ میلی‌متر و با شارژ ۷ درصدی گلوله‌های ۱۰۰ میلی‌متری به آسیای خودشکن، می‌توان ضمن حفظ تناژ بار درگرددش و کنترل حداکثر توانی که آسیا می‌کشد، ابعاد محصول را از ۴۸۱ میکرون به ۱۶۴ میکرون کاهش داد، که در این صورت بازیابی مدار مغناطیسی کارخانه افزایش می‌یابد.

*Grinding Behaviour in a Single Particle Impact Device*", Elsevier.

- [15] Salazar J. L., Magne L., Acuna G., Cubillos F., 2008, "Dynamic Modeling and Simulation of Semi-Autogenous Mills", Elsevier,.

[۱۶] یوسفی، علی اصغر؛ ۱۳۸۰؛ توسعه نرم‌افزاری به منظور تعیین توابع شکست مواد معدنی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

- [11] Morrell S., 2003, "A New Autogenous and Semi-Autogenous Mill Model for Scale-up, Design and Optimization", Elsevier.

- [12] Morrison R. D., Shi R., 2006, Whyte R., "Modeling of Incremental Rock Breakage by Impact-for Use in DEM Models", JKMRRC.

- [13] Nikkhah Kh., Anderson C., 2001, "Role of Simulation Software and Operation of Metallurgical Plants, A Case Study", SME Annual Meeting, USA.

- [14] Meier M., John E., Wieckhusen D., Wirth W., Peukert W., 2008, "Characterization of the

پی‌نوشت

- 
- <sup>1</sup> Abrasion
  - <sup>2</sup> Impact
  - <sup>3</sup> Self-Breakage
  - <sup>4</sup> King
  - <sup>5</sup> Austin
  - <sup>6</sup> M. A. Ford
  - <sup>7</sup> Fortran
  - <sup>8</sup> Crash Stop

