

## شبیه‌سازی مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی توسط نرم‌افزار BMCS

ضیاءالدین پور کریمی<sup>۱</sup>، علی دهقانی احمدآبادی<sup>۲</sup>، محمد نوع‌پرست<sup>۳\*</sup>، سید ضیاءالدین شفایی<sup>۴</sup> و  
محمد رضا سلطانی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات  
<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۴</sup> دانشیار گروه مهندسی معدن - دانشگاه صنعتی شاهرود،

<sup>۵</sup> مدیر پژوهش و فناوری های شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران  
(تاریخ دریافت ۸۶/۷/۲۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۱۲/۱۲، تاریخ تصویب ۸۸/۲/۲۹)

### چکیده

فناوری شبیه‌سازی مدارهای آسیا از حدود ۳۰ سال گذشته مورد استفاده قرار گرفته است و همچنان با توسعه مدل‌های ریاضی جدید که دستگاه‌های مختلف در مسیرهای فرآوری را شبیه‌سازی می‌کنند، کامل‌تر و توانمندتر می‌شود. اینک شبیه‌سازی و مدلسازی مدارهای فرآوری تا حدودی به راحتی قابل انجام است. برای شبیه‌سازی مدار خردایش فعلی کارخانه فسفات اسفوردی، ابتدا اقدام به اندازه‌گیری تابع شکست و انتخاب (در مقیاس آزمایشگاهی) نمونه خوراک ورودی به آسیای گلوله‌ای شد. بر اساس نتایج حاصل از این بررسی، حداکثر مقدار تابع انتخاب (میزان تمایل ذرات برای شکسته شدن)، برای سایز ۶۰۰ میکرون، برابر  $0.11886 \text{ min}^{-1}$  به دست آمد. سپس با استفاده از نرم‌افزار NGOTC و زمان ماند اندازه‌گیری شده در آسیا (مقدار متوسط زمان ماند ذرات در آسیای گلوله‌ای) برابر  $2/07$  (حداکثر  $20$ ) دقیقه به دست آمد. مقدار تابع انتخاب ماده معدنی در مقیاس صنعتی مورد محاسبه قرار گرفت و تأثیر استفاده از گلوله با قطرهای مختلف بر روی آن اندازه‌گیری شد. با انجام این بررسی‌ها مشخص شد که با استفاده از گلوله‌هایی با قطر ۲۵ میلی‌متر، حداکثر تابع انتخاب برابر  $2/5238 \text{ min}^{-1}$  حاصل می‌گردد. در انتها نیز به کمک نرم‌افزار BMCS و با اطلاعات طراحی اولیه کارخانه و نیز نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، اقدام به شبیه‌سازی پارامترها (دانه‌بندی‌های خروجی، درصد جامد و غیره) و مقایسه نتایج حاصل از آنها گردید. مقایسه نتایج نشان داد که روند نمودارها در مدار واقعی و مدار شبیه‌سازی شده یکسان و تا حدودی به هم نزدیک هستند، که این موضوع نشان دهنده صحت شبیه‌سازی انجام شده است.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی، فسفات اسفوردی، مدار خردایش، تابع انتخاب، تابع شکست، آسیای گلوله‌ای

### مقدمه

فناوری شبیه‌سازی در مدار آسیاهای کارخانه‌های فرآوری، موضوع جدیدی نیست و از حدود ۳۰ سال قبل کاربرد دارد. البته در پیشرفت این موضوع، توسعه مدل‌های ریاضی برای واحدها و دستگاه‌های مورد استفاده در مدار کارخانه بسیار حائز اهمیت است [۱]. مجتمع معدنی فسفات اسفوردی در استان یزد واقع است و ماده معدنی پس از استخراج با عیار  $P_2O_5$  ۱۶-۱۰٪ به کارخانه کانه‌آرایی برای پرعبارسازی فسفات فرستاده می‌شود. پس از طی مراحل فرآوری، عیار  $P_2O_5$  در کنسانتره تولیدی این کارخانه به حدود ۳۹-۳۷٪ می‌رسد که قابل ارائه به بازار مصرف است [۲].

مواد معدنی در کارخانه فسفات اسفوردی، پس از خردایش در دو مرحله سنگ‌شکنی وارد آسیای میله‌ای شده و پس از خروج از آن وارد هیدروسیکلون می‌شوند. سرریز هیدروسیکلون وارد مرحله نرمة‌گیری و در نهایت به فلوتاسیون می‌رود و ته‌ریز آن به آسیای گلوله‌ای منتقل می‌شود که محصول آن به همراه محصول آسیای میله‌ای بار دیگر به هیدروسیکلون می‌رود، و این سیکل به همین روش تکرار می‌شود، و در واقع آسیای گلوله‌ای با هیدروسیکلون به صورت مدار بسته قرار دارد. در این تحقیق برای شبیه‌سازی مدار خردایش، از نرم‌افزار BMCS استفاده گردید [۳]. پارامترهای مورد نیاز برای این نرم‌افزار

ابتدا نمونه معرفی از خوراک آسیای گلوله‌ای در مدار خردایش فسفات اسفوردی تهیه شد و پس از تک‌سایز کردن آن، بار (تک‌سایز شده) مربوط به هر طبقه سرندي را داخل آسیا (آزمایشگاهی) ریخته و آسیا شروع به کار کرد. پس از زمان مشخصی که در اینجا زمان با توجه به اندیس کار و سختی ماده معدنی به صورت تجربی ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد، آسیا را خاموش کرده و کل نمونه از آن خارج و سرندي شد. برای صرف دقت بیشتر، نمونه هر فراکسیون حدود ۲۵ دقیقه و به طور یکنواخت و مستمر (به صورت دستی) سرندي شد. پس از این مرحله مواد باقیمانده روی هر سرندي به طور جداگانه توزین شد. سپس تمام مواد بار دیگر در آسیا قرار گرفته و مراحل قبلی انجام شد. این مراحل تا زمانی که حدود ۴۵ الی ۵۰ درصد مواد از سرندي اول عبور کند، ادامه یافت [۵].

پس از انجام آزمایش‌ها و وارد کردن نتایج به نرم‌افزار BFDS و اجرای آن، مقادیر تابع شکست به دست آمد، که در جداول (۱) تا (۳) ماتریس شکست غیر تجمعی ( $b_{ij}$ ) محاسبه شده به سه روش: الف) بروبه، ب) هرست و فورستنا و پ) هرست و فورستنا اصلاح شده، ارائه شده است [۵].

شامل تابع انتخاب، تابع شکست، زمان ماند مواد در آسیا، دبی (بر حسب تن بر ساعت) و درصد جامد خوراک ورودی به آسیا و همچنین پارامترهای هندسی هیدروسیکلون شامل قطر (بدنه) هیدروسیکلون، قطر سرریز، ته‌ریز و دهانه ورودی هیدروسیکلون و ارتفاع آزاد پالپ درون هیدروسیکلون بودند. لازم به توضیح است که به استثنای تابع انتخاب و تابع شکست، سایر پارامترهای ذکر شده را می‌توان از عملیات کارخانه تعیین کرد.

هدف از شبیه‌سازی مدار خردایش فعلی کارخانه فسفات اسفوردی، بررسی عملکرد مدار موجود با توجه به تغییر خوراک ورودی و امکان ایجاد تغییر در مدار از نظر قطر گلوله مورد استفاده در آسیای گلوله‌ای، درصد وزنی جامد در پالپ و نسبت خردایش با حفظ ظرفیت آن است.

### محاسبه تابع شکست نمونه‌ها توسط نرم‌افزار BFDS

نرم‌افزار BFDS برای محاسبه تابع شکست مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. بدین منظور لازم است تا با انجام آزمایش‌های خردایش روی ماده معدنی، اطلاعات مورد نیاز این نرم‌افزار تأمین شود. بنابراین در این پروژه

جدول ۱: ماتریس تابع شکست محاسبه شده توسط نرم‌افزار BFDS به روش بروبه.

Screen Size (Mic)	$b_{ij}$ (20-30)	$b_{ij}$ (30-40)	$b_{ij}$ (40-50)	$b_{ij}$ (50-70)		$b_{ij}$ (70-100)		$b_{ij}$ (100-150)	$b_{ij}$ (150-200)	$b_{ij}$ (-200)
				First	Repeat	First	Repeat			
850	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
600	0.5022	0	0	0	0	0	0	0	0	0
425	0.1754	0.5653	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0.0809	0.1535	0.4849	0	0	0	0	0	0	0
212	0.0654	0.0602	0.1401	0.4014	0.4014	0	0	0	0	0
150	0.0568	0.0875	0.1555	0.3134	0.3134	0.6308	0.6330	0	0	0
106	0.0414	0.0355	0.0676	0.1080	0.1080	0.1490	0.1400	0.5562	0	0
75	0.0346	0.0359	0.0599	0.0698	0.0698	0.0955	0.0897	0.2115	0.6048	0

جدول ۲: ماتریس تابع شکست محاسبه شده توسط نرم‌افزار BFDS به روش هرست و فورستنا.

Screen Size (Mic)	$b_{ij}$ (20-30)	$b_{ij}$ (30-40)	$b_{ij}$ (40-50)	$b_{ij}$ (50-70)		$b_{ij}$ (70-100)		$b_{ij}$ (100-150)	$b_{ij}$ (150-200)	$b_{ij}$ (-200)
				First	Repeat	First	Repeat			
850	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
600	0.6193	0	0	0	0	0	0	0	0	0
425	0.1005	0.6428	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0.0574	0.1055	0.5613	0	0	0	0	0	0	0
212	0.0399	0.0588	0.1231	0.4838	0.4838	0	0	0	0	0
150	0.0604	0.0690	0.1255	0.2408	0.2408	0.6256	0.6226	0	0	0
106	0.0367	0.0339	0.0591	0.0910	0.0910	0.1365	0.1343	0.4335	0	0
75	0.0353	0.0320	0.0468	0.0698	0.0698	0.1016	0.0968	0.2472	0.5544	0

جدول ۳: ماتریس تابع شکست محاسبه شده توسط نرم افزار BFDS به روش هریست و فورستانی اصلاح شده.

Screen Size (Mic)	$b_{ij}$ (20-30)	$b_{ij}$ (30-40)	$b_{ij}$ (40-50)	$b_{ij}$ (50-70)		$b_{ij}$ (70-100)		$b_{ij}$ (100-150)	$b_{ij}$ (150-200)	$b_{ij}$ (-200)
				First	Repeat	First	Repeat			
850	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
600	0.4433	0	0	0	0	0	0	0	0	0
425	0.1967	0.5464	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0.0912	0.1592	0.4596	0	0	0	0	0	0	0
212	0.0566	0.0776	0.1761	0.3847	0.3847	0	0	0	0	0
150	0.0776	0.0836	0.1576	0.3151	0.3151	0.5777	0.5780	0	0	0
106	0.0432	0.0384	0.0681	0.1051	0.1051	0.1664	0.1616	0.3830	0	0
75	0.0391	0.0348	0.0514	0.0765	0.0765	0.1139	0.1081	0.2824	0.5303	0

موضوع با آگاهی از مقدار اندیس کار ماده معدنی فسفات اسفوردی، که برابر حدود ۸-۹ کیلو وات ساعت به ازای یک تن کوچک است، مستدل تر و تأیید می‌شود [۶].

### تعیین تابع انتخاب

تابع انتخاب، یکی از پارامترهای اصلی در مدل سازی آسیاهای گلوله‌ای است. تابع انتخاب شاخص سینتیک، فرآیند آسیا شدن مواد است و بستگی به عوامل مختلفی مانند خصوصیات کانه، قطر آسیا، سرعت گردش آسیا، اندازه و جنس گلوله‌ها دارد. ناپدید شدن مواد از یک طبقه سرنندی در مورد آسیاهای گلوله‌ای در اغلب موارد از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند [۵ و ۷]. در یک آسیای ناپیوسته، ترسیم کسر جرم باقیمانده روی یک سرنده، روی کاغذ لگاریتمی بر حسب زمان باید یک خط مستقیم را نشان دهد. البته در اغلب اوقات با توجه به آنکه مواد از سرندهای بالاتر نیز خرد می‌شوند، این مطلب پنهان می‌ماند. در مورد درشت‌ترین طبقه ابعادی، در اثر خردایش هیچگونه موادی به آن اضافه نمی‌شود و رابطه خطی هنگامی که مواد همگن هستند، به شکل نمودار به دست می‌آید.

برای تعیین تابع انتخاب آزمایشگاهی، همان‌گونه که پیش از این نیز توضیح داده شد، از نرم‌افزار BFDS استفاده شد. جدول (۴) نشان دهنده تابع انتخاب محاسبه شده در مقیاس آزمایشگاهی و شکل (۱) نمایانگر تغییرات ثابت نرخ خردایش (تابع انتخاب) بر حسب تابعی از ابعاد ذرات است. همان‌گونه که در جدول (۴) و شکل (۱) مشاهده می‌شود، ماکزیمم تابع انتخاب در بین سایز ۸۵۰-۱۱۸۰ میکرون رخ داده است. البته برای سایز درشت‌تر از ۱۱۸۰ میکرون، مقدار تابع انتخاب دیگر محاسبه نشد، زیرا سایزهای درشت‌تر از ۱۱۸۰ در محصول آسیای گلوله‌ای

همان‌طور که در جداول (۱) تا (۳) ملاحظه می‌شود، در ارقام مندرج در هر ستون، از طبقه سرنندی بالا به پایین، روندی نزولی وجود دارد که با توجه به اینکه در هر سیکل مقداری از وزن نمونه در آن فراکسیون در اثر شکست و انتقال به طبقات سرنندی بعدی کم شده و به طبقات دیگر اضافه می‌شود، روند صحیح و درستی وجود دارد. اما این روند از سایز ۲۱۲ به ۱۵۰ میکرون در ستون‌های اولیه (یعنی سایزهای درشت‌تر) در هر سه روش حاکم است و افزایشی در مقدار تابع شکست وجود دارد و بار دیگر از ۱۵۰ میکرون به بعد، همان روند سابق غالب است. پس برای حصول اطمینان از صحت اطلاعات و تأیید نحوه انجام آزمایش و عدم وجود خطا در آنها، تصمیم گرفته شد آزمایش‌ها در این دو سایز تکرار شود همان‌گونه که در جداول (۱) تا (۳) مشاهده می‌شود، تغییر چندانی در نتایج حاصل نشد و این روند بار دیگر مشاهده شد. با مطالعه سابقه کانی‌شناسی و مینرالوگرافی کانسنگ این نتیجه حاصل شد که ماده معدنی در خردایش از سایز ۲۱۲ به ۱۵۰ میکرون حساسیت زیادی در تولید نرمه دارد و این موضوع تنها ناشی از ساختار کانی‌شناسی کانسنگ است. نتایج حاصل برای تابع شکست در سایزهای مختلف دلالت بر آن داشتند که با توجه به سایز اولیه، از ۴۰ تا ۶۳ درصد ذرات از سایز اولیه، به یک سایز ریزتر منتقل می‌شوند و این مقدار برای انتقال به دو سایز ریزتر تقریباً از ۱۴٪ تا ۳۱٪ را در بر می‌گیرد و حتی حدود ۸ تا ۱۵ درصد از ذرات به سه سایز ریزتر نیز منتقل می‌شوند. مقایسه این نتایج با سنگ‌های مقاوم که انتقال مواد به یک سایز ریزتر حداکثر ۳۰٪ است [۵]، بیانگر این نکته است که مقاومت ماده معدنی فسفات اسفوردی در برابر خردایش چندان بالا نیست، و این

با توجه به ابعاد بار ورودی و خروجی آسیای گلوله‌ای مجموعه سرنندی ۸۵۰، ۶۰۰، ۴۲۵، ۳۰۰، ۲۱۲، ۱۵۰، ۱۰۶ و ۷۵ میکرون بر اساس استاندارد ASTM انتخاب شد. نتایج به دست آمده از آنالیز سرنندی خوراک و محصول آسیای گلوله‌ای در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵: نتایج آنالیز سرنندی خوراک و محصول آسیای گلوله‌ای.

Size Class (microns)	Percent On Screen (Ball Mill Feed)	Percent On Screen (Ball Mill Product)
+850	0.37	0.15
-850+600	0.59	0.23
-600+425	1.80	0.82
-425+300	1.04	0.79
-300+212	13.65	9.96
-212+150	12.36	9.28
-150+106	19.51	18.25
-106+75	23.34	25.53
-75	27.34	34.99

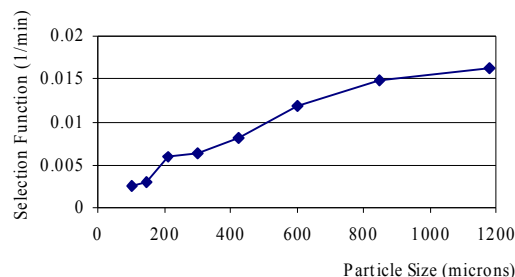
#### اندازه‌گیری زمان ماند مواد در آسیای گلوله‌ای

برای اندازه‌گیری زمان ماند (RTD) ذرات در آسیای گلوله‌ای، میزان pH در شاخه‌های ورودی و خروجی آسیای گلوله‌ای در فواصل زمانی مختلف تعیین شد. بر این اساس ابتدا مقدار ۲۵ کیلوگرم سود (NaOH)، به عنوان ماده ردیاب برای تعیین زمان ماند ذرات در آسیای گلوله‌ای به شوت خوراک ورودی آسیای گلوله‌ای (تهریز هیدروسیکلون) اضافه و مقدار pH در زمان‌های مختلف در شاخه‌های ورودی و خروجی آسیا اندازه‌گیری شد تا به pH اولیه برسد. سپس با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی (شبیه‌سازی توزیع زمان ماند در مدارهای باز و بسته، ویرایش ۱/۱) توزیع زمان ماند [۹]، مقدار متوسط زمان ماند ذرات در آسیای گلوله‌ای برابر ۲/۰۷ (حداکثر ۲۰) دقیقه به دست آمد که نتایج حاصل در شکل (۲) و جدول (۶) ارائه شده است (لازم به ذکر است که برای تعیین pH از دستگاه pH متر، پس از کالیبره شدن دستگاه به ترتیب با بافرهای ۷ و ۹ استفاده شد).

#### تعیین تابع انتخاب (صنعتی) توسط نرم‌افزار NGOTC

با توجه به اینکه سه ماتریس مقادیر تابع شکست بر اساس روش‌های بروبه، هرست و فورستانو و هرست و فورستانوی اصلاح شده، به دست آمد، بنابراین سه ماتریس

وجود ندارد که در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گیرد. البته برای محدوده ابعادی ۲۱۲ میکرون تغییراتی در روند معمول تابع انتخاب رخ می‌دهد، که دلالت بر خرد شوندگی زیاد ماده معدنی در این سایز خاص است.



شکل ۱: تغییرات مقادیر تابع انتخاب آزمایشگاهی با ابعاد ذرات.

جدول ۴: مقادیر تابع انتخاب آزمایشگاهی محاسبه شده.

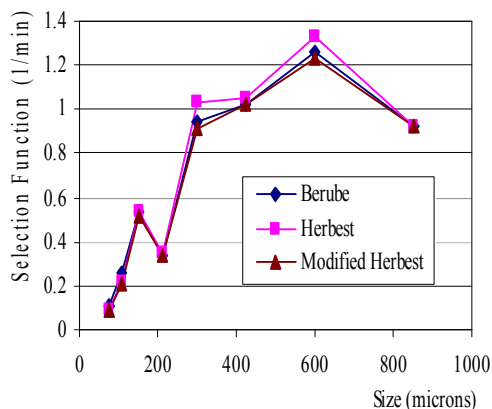
Size Class (microns)	Laboratory Selection Function (l/min)
+1180	0.01616
-1180+850	0.014792
-850+600	0.011886
-600+425	0.008192
-425+300	0.006379
-300+212	0.005969
-212+150	0.002959
-150+106	0.002489

یکی از نرم‌افزارهایی که برای تعیین تابع انتخاب صنعتی بکار می‌رود، نرم‌افزار NGOTC است [۸]. این نرم‌افزار با گرفتن اطلاعاتی نظیر تابع شکست ماده معدنی، توزیع ابعادی بار ورودی و خروجی آسیا (با طبقات سرنندی مشابه طبقات سرنندی تابع شکست)، اندازه گلوله‌ها، مقدار (تناژ) خوراک، زمان ماند مواد در آسیا و تابع انتخاب آزمایشگاهی (به دست آمده از نرم‌افزار BFDS) مقدار تابع انتخاب را در مقیاس صنعتی محاسبه می‌کند. بنابراین در این مرحله که مقادیر تابع انتخاب در مقیاس آزمایشگاهی به دست آمد، می‌توان با استفاده از نرم‌افزار NGOTC، مقدار صنعتی تابع انتخاب را برای کانسنگ فسفات اسفوردی محاسبه کرده، تا بر اساس آن بتوان شبیه‌سازی محاسبه قطر بهینه گلوله مورد نیاز را ممکن کرد.

#### تجزیه سرنندی خوراک و محصول آسیای گلوله‌ای

در این باره نمونه معرف تهیه شده از خوراک و محصول آسیای صنعتی، مورد تجزیه سرنندی قرار گرفت.

است، بنابراین برای محاسبات بعدی، نتایج حاصل از این روش به عنوان مبنا، مورد استفاده قرار گرفت. کاهش مقدار تابع انتخاب پس از سایز ۶۰۰ میکرون به طور کامل بارز است و این کاهش در نتایج حاصل از هر سه روش وجود دارد. بیشترین مقدار تابع انتخاب، برابر ۱/۲۶۱۸۹۰ بر دقیقه و در سایز ۶۰۰ میکرون اتفاق افتاد و در واقع بیانگر آن است که در این سایز بیشترین انتخاب ذرات برای شکست ذرات وجود دارد و برای سایزهای ریزتر و درشت تر از آن، این احتمال کاهش می یابد. البته این کاهش برای سایزهای درشت تر به دلیل کافی نبودن انرژی گلوله برای شکست ذرات است، در حالی که این کاهش برای سایزهای ریزتر به دلیل احتمال کمتر گیر کردن ذرات بین گلوله ها است. همچنین شایان توجه است که مقادیر تابع انتخاب در مقیاس آزمایشگاهی (جدول ۴، شکل ۱) دلالت بر آن دارد که ماکزیمم آن در سایز ۸۵۰-۱۱۸۰ میکرون اتفاق می افتد، در حالی که پس از بزرگنمایی شدن مقادیر تابع انتخاب، این سایز به ۶۰۰ میکرون تبدیل شد.



شکل ۳: تغییرات تابع انتخاب در مقیاس صنعتی با ابعاد ذرات (مقایسه سه روش).

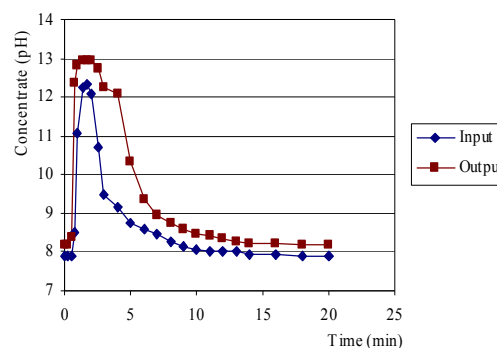
### بررسی تأثیر ابعاد گلوله بر تابع انتخاب

نرم افزار NGOTC این توانایی را دارد که با توجه به ابعاد مختلفی از گلوله های مورد استفاده در آسیا نیز تابع انتخاب را محاسبه کند. برای این هدف قطر متوسط گلوله های مورد استفاده در آسیا و همچنین قطر جدید پیشنهادی گلوله ها مورد نیاز است. با توجه به اینکه قطر متوسط گلوله های مورد استفاده در کارخانه کانه آرایی فسفات اسفوردی ۵۰ میلی متر است (تنها یک سایز گلوله

نیز برای تابع انتخاب در مقیاس صنعتی یا ثابت نرخ خردایش توسط نرم افزار NGOTC محاسبه شد که نتایج حاصل از آن در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۶: نتایج شبیه سازی زمان ماند آسیای گلوله ای.

Ball mill simulation	
Simulation model	Weller
K	10.10
Tpf	0.43
Ts	0.18
Tl	1.28
Mean residence time	2.07
Sum of squares	0.00
Error (%)	28



شکل ۲: نمودار توزیع زمان ماند آسیای گلوله ای مدار بسته.

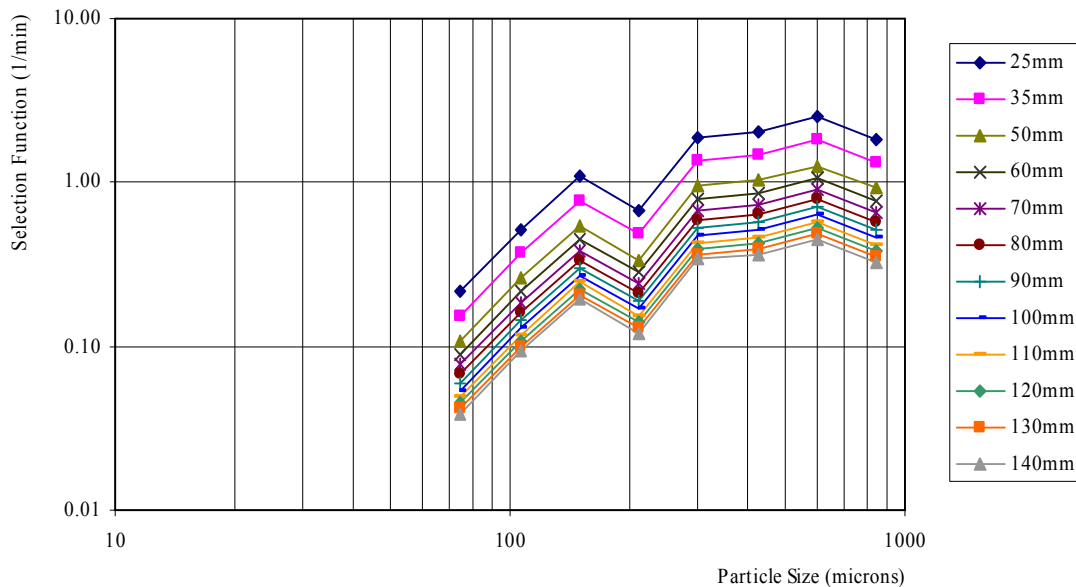
جدول ۷: تعیین ثابت نرخ خردایش (تابع انتخاب) در مقیاس صنعتی به روش های مختلف.

Size Classes (microns)	Selection Function (1/min)		
	Berube	Herbest and Furestenau	Modified Herbest and Furestenau
+850	0.918959	0.918959	0.918959
-850+600	1.261890	1.331171	1.227048
-600+425	1.026873	1.055812	1.017931
-425+300	0.947134	1.037090	0.913653
-300+212	0.337115	0.345170	0.338651
-212+150	0.539878	0.534126	0.520217
-150+106	0.259913	0.221222	0.209154
-106+75	0.107678	0.090118	0.088870

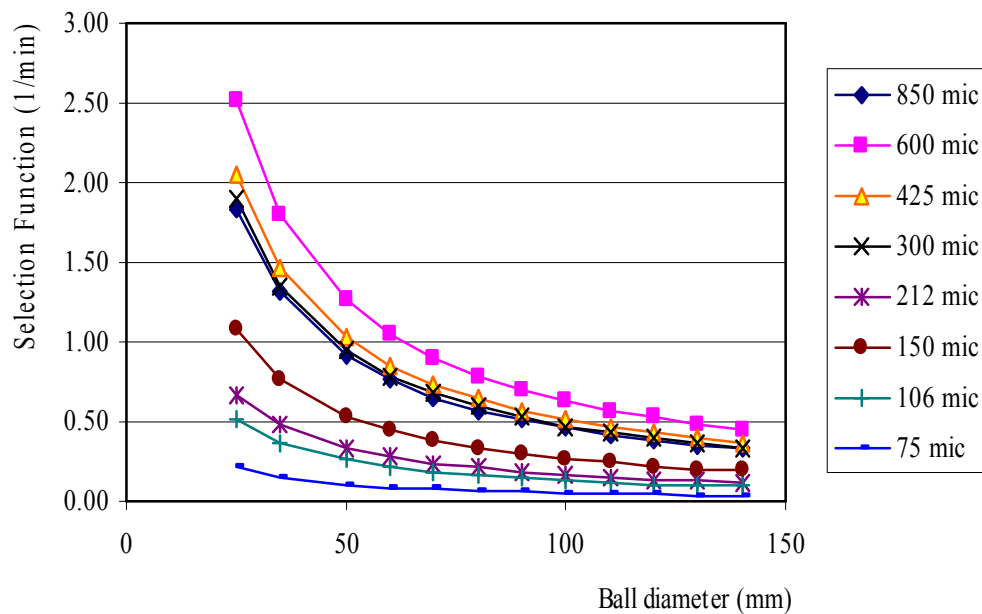
شکل (۳) روند مقادیر محاسبه شده تابع انتخاب در مقیاس صنعتی، حاصل از سه روش ذکر شده را مقایسه کرده است. همان گونه که در شکل نیز مشاهده می شود، مقادیر حاصل از روش بروبه تقریباً متوسط دو روش دیگر

چند نوع گلوله استفاده می‌شود [۱۰، ۱۱ و ۱۲]. نمودار تغییرات تابع انتخاب بر حسب ابعاد ذرات و ابعاد گلوله‌ها به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این نمودارها تنها برای روش بروبه رسم شده‌اند.

مورد استفاده قرار می‌گیرد)، بنابراین بر این اساس، داده‌های مورد نیاز نرم‌افزار وارد و برنامه اجرا شد. لازم به ذکر است که محققان بسیاری نشان داده‌اند که در صورت استفاده از چند نوع گلوله مختلف با قطرهای متفاوت، نتایج به دست آمده برای سینتیک خردایش، معادل زمانی است که از یک نوع گلوله با قطر متوسط



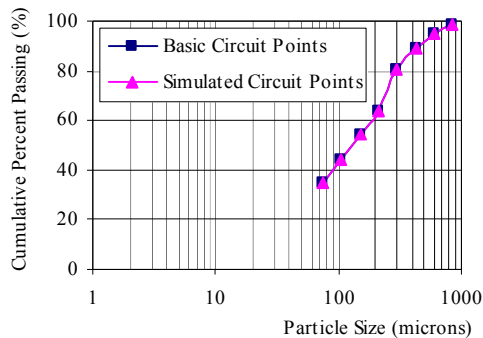
شکل ۴: تغییرات مقادیر تابع انتخاب با ابعاد ذرات (برای گلوله‌های ۲۵ تا ۱۴۰ میلی‌متری).



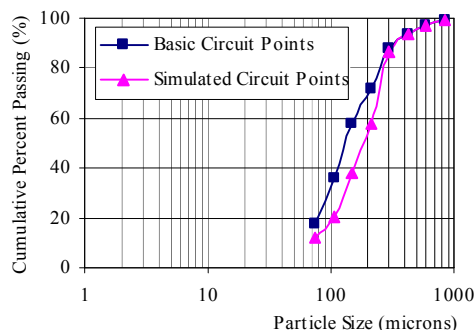
شکل ۵: تغییرات مقادیر تابع انتخاب با ابعاد گلوله‌ها (برای طبقات سرنندی ۷۵ تا ۸۵۰ میکرون).

## شبهه سازی مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی

در شکل (۶)، فلوشیت بخشی از مدار اصلی خردایش کارخانه فسفات اسفوردی که در حال کار است، ارائه شده است. اطلاعات این مدار با استفاده از داده‌های طراحی است که توسط نرم‌افزار BMCS مورد شبهه‌سازی قرار گرفته است. یکی از پارامترهای مورد نیاز برای شبهه‌سازی مدارهای خردایش که سبب افزایش دقت در شبهه‌سازی می‌شود، اندازه‌گیری زمان ماند آسیای صنعتی و پارامترهای مدل جریان پیستونی است که نقش بسزایی در صحت شبهه‌سازی و قابل اطمینان بودن آن دارد. پس لازم به ذکر است که این موضوع در این پروژه در نظر گرفته شده است و از داده‌های ذکر شده (اندازه‌گیری زمان ماند مواد در داخل آسیای صنعتی) در شبهه‌سازی استفاده شد. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود در نمودارهای اشکال (۷) تا (۱۱) نتایج آنالیز سرنندی مدار واقعی (اصلی) و مدار شبهه‌سازی شده در بخش‌های خوراک اولیه (خروجی آسیای میله‌ای)، خوراک، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون و محصول آسیای گلوله‌ای نشان داده شده است.



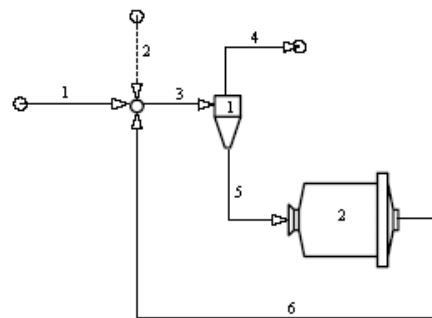
شکل ۷: مقایسه دانه‌بندی خوراک اولیه مدار واقعی و شبهه‌سازی شده.



شکل ۸: مقایسه دانه‌بندی خوراک هیدروسیکلون مدار واقعی و شبهه‌سازی شده.

در نمودار شکل (۴) ملاحظه می‌شود که تغییرات تابع انتخاب با ابعاد ذرات افزایش می‌یابد و به حد ماکزیمم می‌رسد. سپس با افزایش ابعاد ذرات، روندی نزولی می‌یابد. بخش صعودی نمودار را در اصطلاح، قسمت نرمال و بخش نزولی را قسمت غیر نرمال نمودار می‌نامند [۱۳، ۱۴]. در این نمودار مشاهده می‌شود که قسمت غیر نرمال دو بار تکرار شده و در واقع در تمام سایز گلوله‌های استفاده شده، یک بار در نقطه ۲۱۲ میکرون و یک بار در ۶۰۰ میکرون افت نمودار ظاهر و در واقع، شکست صورت پذیرفته است. همان‌گونه که توضیح آن پیش از این نیز گذشت، ماده معدنی در سایز ۲۱۲ میکرون راحت‌تر از سایزهای دیگر خرد می‌شود و یا نرمه بیشتری از خردایش ذرات این سایز به وجود می‌آید و این موضوع به دلیل خواص کانی‌شناسی و درجه آزادی کانسنگ است.

همچنین در سایز ۶۰۰ میکرون نیز شکست اصلی اتفاق می‌افتد و از آن به بعد نمودار، روند نزولی دارد و بخش غیر نرمال نمودار در این قسمت ظاهر می‌شود که اطلاعات طراحی کارخانه نیز مؤید این موضوع است. در ضمن ملاحظه می‌شود که گلوله‌هایی با قطر کوچک، سبب افزایش میزان تابع انتخاب شدند که بهترین حالت در گلوله‌ای با قطر ۲۵ میلی‌متر ایجاد شده است. توضیح داده شده بود که بیشترین مقدار تابع انتخاب در شرایط آزمایشگاهی در محدوده ابعادی ۸۵۰-۱۱۸۰ میکرون رخ داد (شکل ۱، جدول ۴) که نتایج حاصل از محاسبه تابع انتخاب برای گلوله‌هایی با قطرهای مختلف به دست داد که در صورت استفاده از گلوله‌های ۲۵ میلی‌متری، این ابعاد به ۶۰۰ میکرون منتقل می‌شود. بدین معنی که ماکزیمم خردایش در مقیاس صنعتی و با کاربرد گلوله‌های ۲۵ میلی‌متری، به سایز ریزتر ۶۰۰ میکرون منتقل می‌شود.



شکل ۶: فلوشیت مدار شبهه‌سازی شده توسط نرم‌افزار BMCS.

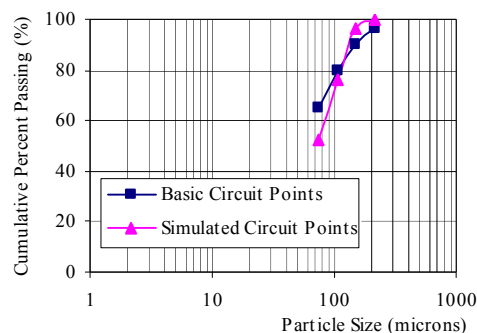
خوبی دارند. البته در سایزهای ریزتر از ۳۰۰ میکرون نقاط حاصل از شبیه‌سازی کمی از نقاط دانه‌بندی واقعی فاصله می‌گیرند که این امر می‌تواند نشان‌دهنده دقت بالای نرم‌افزار در سایزهای درشت‌تر از ۳۰۰ میکرون و دقت پایین‌تر آن در سایزهای ریزتر از ۳۰۰ میکرون باشد. اما به طور کلی همان‌گونه که در اشکال (۷) تا (۱۱) ملاحظه می‌شود، روند نمودارها در مدار واقعی و مدار شبیه‌سازی شده یکسان و تقریباً به هم نزدیک می‌باشند، که دلالت بر صحت شبیه‌سازی انجام شده، دارد. در جدول (۸) نیز نتایج موازنه مدار حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده است.

جدول ۸: نتایج موازنه مدار حاصل از شبیه‌سازی.

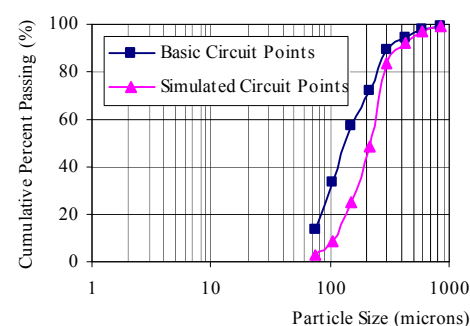
Stream No.	Stream Name	Solid (t/h)	Solid (%)	Water (t/h)
1	Fresh Feed	57.5	60.00	38.3
2	Added Water	0	0	172.5
3	Hydrocyclone Feed	312.983	56.94	236.66
4	Hydrocyclone Overflow	57.486	21.43	210.8
5	Hydrocyclone Underflow	255.497	90.81	25.86
6	Ball Mill Discharge	255.497	90.81	25.86

### خلاصه و نتیجه‌گیری

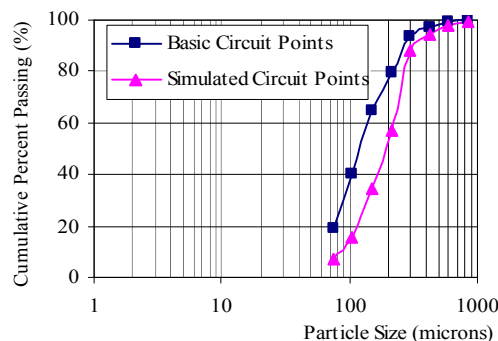
برای شبیه‌سازی مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی، از نرم‌افزار BMCS استفاده شد. در این باره لازم بود تا برخی پارامترهای مورد نیاز این نرم‌افزار مورد محاسبه قرار گرفته و سپس در نرم‌افزار به کار برده شوند. پارامترهای مورد نیاز شامل تابع انتخاب، تابع شکست، زمان ماند مواد در آسیا، دبی (بر حسب تن بر ساعت) و درصد جامد خوراک ورودی به آسیا و همچنین پارامترهای هندسی هیدروسیکلون شامل قطر بدنه، سرریز، ته‌ریز و دهانه ورودی هیدروسیکلون و ارتفاع آزاد پالپ درون هیدروسیکلون هستند. عوامل ذکر شده، به‌استثنای تابع انتخاب و تابع شکست را می‌توان با اندازه‌گیری در کارخانه تعیین کرد. در این پروژه برای تعیین تابع انتخاب و تابع شکست، ابتدا زمان ماند آسیای گلوله‌ای در کارخانه توسط NaOH به‌عنوان ردیاب اندازه‌گیری شد و عوامل مربوط به زمان ماند مدل جریان پیستونی به دست آمد.



شکل ۹: مقایسه دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون مدار واقعی و شبیه‌سازی شده.



شکل ۱۰: مقایسه دانه‌بندی ته‌ریز هیدروسیکلون مدار واقعی و شبیه‌سازی شده.



شکل ۱۱: مقایسه دانه‌بندی آسیای گلوله‌ای مدار واقعی و شبیه‌سازی شده.

همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، انطباق کامل نقاط مدار واقعی و مدار شبیه‌سازی شده، نشان‌دهنده یکسان بودن دانه‌بندی خوراک اولیه مورد استفاده در هر دو حالت (مدار واقعی و مدار شبیه‌سازی شده) است. همچنین نکته دیگری که به طور مشخص در اشکال (۸) تا (۱۱) به نظر می‌رسد آن است که در سایزهای درشت‌تر (بیشتر از ۳۰۰ میکرون) دانه‌بندی نقاط واقعی و نقاط شبیه‌سازی شده انطباقی به نسبت



محاسبه کند. برای این هدف، قطر متوسط گلوله‌های مورد استفاده در آسیا و همچنین قطر جدید پیشنهادی گلوله‌ها مورد نیاز است. با توجه به اینکه قطر متوسط گلوله‌های مورد استفاده در کارخانه کانه‌آرایی فسفات اسفوردی، ۵۰ میلی‌متر است (تنها یک سایز گلوله مورد استفاده قرار می‌گیرد)، پس، داده‌های مورد نیاز وارد نرم‌افزار شده و برنامه اجرا شد. همچنین مشاهده شد که گلوله‌هایی با قطر کمتر، سبب افزایش مقدار تابع انتخاب شدند و بهترین حالت در گلوله‌ای با قطر ۲۵ میلی‌متر، که برابر ۲/۵۲۳۸ بر دقیقه و برای سایز ۶۰۰ میکرون بود.

با استفاده از نرم‌افزار BMCS قسمتی از مدار اصلی خردایش کارخانه فسفات اسفوردی که در حال کار است، شبیه‌سازی قرار شد. اطلاعات حاصل از آزمایش‌های مختلف، به عنوان داده‌های ورودی مورد نیاز، وارد شدند. در این شبیه‌سازی از زمان ماند آسیای صنعتی و پارامترهای مدل جریان پیستونی نیز استفاده شد، که نقش بسزایی در صحت شبیه‌سازی و قابل اطمینان بودن آن دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده روی مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی و همچنین روند نمودارها در مدار واقعی و مدار شبیه‌سازی شده یکسان و به طور تقریبی به هم نزدیک بود که این موضوع دلالت بر صحت شبیه‌سازی انجام شده دارد.

### تقدیر و تشکر

این پروژه در راستای قرارداد تحقیقاتی با مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران-یزد انجام شد. بدینوسیله از کمک‌های آن مرکز تقدیر و سپاسگزاری می‌شود.

بدین منظور پس از استانداردسازی آسیای آزمایشگاهی مطابق با مشخصات آسیای باند، تابع شکست ماده معدنی در آزمایشگاه، تعیین و توابع شکست به سه روش بروبه، هریست و فورستانو و روش هریست و فورستانوی اصلاح شده توسط نرم‌افزار BFDS مورد محاسبه شد. با توجه به نتایج حاصل، روش بروبه (به‌عنوان مناسب‌ترین روش) تعیین شد. همان‌گونه که ذکر شد، روند نزولی تابع شکست از فراکسیون ۸۵۰ به ۷۵ میکرون در تغییر از سایز ۲۱۲ میکرون به ۱۵۰ میکرون رعایت نشده بود که با مطالعه سابقه کانی‌شناسی و مینرالوگرافی کانسنگ این نتیجه حاصل شد که تولید نرمه در خردایش از سایز ۲۱۲ به ۱۵۰ میکرون زیاد است و این موضوع می‌تواند ناشی از ساختار کانی‌شناسی کانسنگ باشد. سابقه کارخانه و پروژه‌های تعریف شده در جهت حذف نرمه از خط تولید کارخانه نیز مؤید این موضوع است.

همچنین مقادیر تابع انتخاب آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار BFDS برای فراکسیون‌های ۱۱۸۰ تا ۷۵ میکرون به ترتیب معادل ۰/۰۱۶۱۶۰، ۰/۰۱۴۷۹۲، ۰/۰۱۱۸۸۶، ۰/۰۰۸۱۹۲، ۰/۰۰۶۳۷۹، ۰/۰۰۵۹۶۹، ۰/۰۰۲۹۵۹ و ۰/۰۰۲۴۸۹ ( $\text{min}^{-1}$ ) به دست آمد و توسط نرم‌افزار NGOTC به مقیاس صنعتی بزرگنمایی شد. این مقادیر برای فراکسیون‌های ذکر شده به ترتیب معادل: - ، ۰/۹۱۸۹۵۹، ۱/۲۶۱۸۹۰، ۱/۰۲۶۸۷۳، ۰/۹۴۷۱۳۴، ۰/۳۳۷۱۱۵، ۰/۵۳۹۸۷۸، ۰/۲۵۹۹۱۳ و ۰/۱۰۷۶۷۸ ( $\text{min}^{-1}$ ) حاصل شد.

نرم‌افزار NGOTC این توانایی را دارد که با توجه به ابعاد گلوله‌های مورد استفاده در آسیا، تابع انتخاب را

### مراجع

- 1 - Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R. D. and Kojovic, T. (1999). *Mineral comminution circuits, their operation and optimization*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Center (JKMRCK), The University of Queensland.
- 2 - *Internal Technical Reports and Documents*, Esfordi Phosphate Company.
- 3 - Farzanegan, A. and Laplante, R. A. (2004). *Ball Milling Circuits Simulation (BMCS)*. Version 1.1, McGill University, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Mineral Processing Group.
- 4 - Yousefi, A.A., Farzanegan, A. and Irannezhad, M. (2001). *Breakage Function Determination Software (BFDS)*. Version 1.0, Amirkabir University of Technology, Faculty of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- 5 - Austin, L.G., Klimpel, R. R. and Luckie, P. T. (1984). *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling*. Society of Mining Engineers (SME) Publishers.

- 6 - Noaparast, M. and et. Al. (2007). *Study on Deleting Ball Mill from Esfordi Phosphate Processing Plant*. Yazd-Iran Mineral Research Center.
- 7 - Farzanegan, A. (2003). *Control and Modelling of Mineral Processing*. Course Note, Amirkabir University.
- 8 - Farzanegan, A. and Laplant, R. A. (1998). *Numerical Grinding Optimization Tools in C (NGOTC)*. McGill University, Dep. of Mining and Metallurgical Engineering, Mineral Processing Group.
- 9 - Javadi, F. and Banisi, S. (1997). *Simulation Software of Residence Time Distribution in Open and Closed Circuits*. Version 1.1, Shahid Bahonar University.
- 10 - Prasher, C.L. (1987). *Crushing and grinding process handbook*. John Wiley & Sons.
- 11 - Zhenhua, M., Sian, H., Shaoming, Z. and Xinzhang, P. (1998). "Breakage behavior of quartz in a laboratory stirred ball mill." *Power Technology 100*, PP. 69-73.
- 12 - King, R. P. (2001). *Modelling and simulation of mineral processing systems*. Butterworth-Heinemann.
- 13 - Deniz, V. (2003). "A study on the specific rate of breakage of cement materials in a laboratory ball mill." *Cement and Concentrate Research 33*, PP. 439-445.
- 14 - Kotake, N., Daibo, K., Yamamoto, T. and Kanda, Y. (2004). "Experimental investigation on grinding rate constant of solid materials by a ball mill-effect of ball diameter and feed size." *Powder Technology 143-144*, PP. 196-203.

#### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Plitt

2 - Selectivity Curve

3 - Tromp Curve