

## مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون با نرم‌افزارهای *BMCS* و *COMSIM*، *MODSIM*

لیلا پرنده<sup>۱</sup>، علی دهقانی<sup>۲\*</sup>، مهدی خسروی<sup>۳</sup>، محمد نوع‌پرست<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد؛ Email: L.parand@yahoo.com

۲- استادیار دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی؛ Email: a.dehghani@yazduni.ac.ir

۳- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق و کارشناس ارشد مرکز تحقیقات مهندسی وابسته به دانشگاه یزد.

۴- استاد دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی معدن؛ Email: noparast@ut.ac.ir

(دریافت ۲۸ آبان ۱۳۸۸، پذیرش ۱۲ آبان ۱۳۸۹)

### چکیده

با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی، عملکرد مدارهای فراوری در شرایط مختلف قابل پیش‌بینی و بهینه‌سازی است. در سال‌های اخیر، مدل‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی برای شبیه‌سازی مدارهای آسیا ارائه شده است. در این تحقیق، شبیه‌سازی مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون با استفاده از نرم‌افزارهای *MODSIM*، *COMSIM* و *BMCS* بررسی قرار گرفته شد. به این منظور، ابتدا، با انجام آزمایش‌های تابع شکست روی نمونه خوراک آسیای گلوله‌ای، پارامترهای مدل تجربی تابع شکست و مدل تابع انتخاب آستین محاسبه گردیده است. سپس، با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی پالپ، زمان ماند مواد داخل آسیا محاسبه شده است. در ادامه با نمونه‌گیری از خوراک و محصولات هیدروسیکلون، ضرایب مدل‌های پلیت و ناگسواراژو نیز تعیین گردیده‌اند. آن‌گاه، مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون با نرم‌افزارهای فوق شبیه‌سازی شده‌اند. مقایسه دبی و توزیع ابعادی اندازه‌گیری شده در شاخه‌های مختلف مدار آسیا با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که، هر سه نرم‌افزار، با دقت خوبی قادر به پیش‌بینی مشخصات شاخه‌های مختلف مدار بوده‌اند، ولی نرم‌افزار *MODSIM* خطای نسبی کمتری داشت. با استفاده از این نرم‌افزارها، می‌توان تاثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد مدار آسیای گلوله‌ای را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نمود.

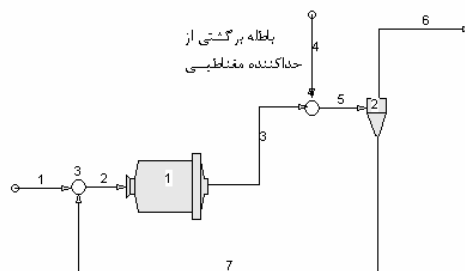
### کلمات کلیدی

شبیه‌سازی، آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون، تابع انتخاب، تابع شکست، زمان ماند، *MODSIM*، *COMSIM*، *BMCS*

\* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

## ۱- مقدمه

یکی از روش‌های مناسب برای بهینه کردن مدارهای خردایش، مدل‌سازی و شبیه‌سازی است. با استفاده از شبیه‌سازی مدار، می‌توان رفتار و عملکرد کارخانه را در شرایط مختلف پیش‌بینی نمود و برای ارزیابی گزینه‌های مختلف با هزینه و ریسک کمتری اقدام کرد [۱]. در سال‌های اخیر مدل‌ها و نرم‌افزارهای متعددی برای شبیه‌سازی مدارهای آسیاهای گلوله‌ای به بازار ارائه شده است. در این تحقیق، نتایج شبیه‌سازی مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون با استفاده از سه نرم‌افزار مرسوم خردایش شامل: MODSIM، COMSIM و BMCS مقایسه شده‌اند. آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون در مدار بسته با هیدروسیکلون قرار دارد (شکل ۱). بار اولیه این مدار (جریان ۱) کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی مرحله اول است و سرریز هیدروسیکلون (جریان ۶)، خوراک جداکننده‌های مغناطیسی مرحله دوم را تأمین می‌کند. باطله جداکننده کلینر (جریان ۴) این مرحله به خروجی آسیا اضافه می‌شود.



شکل ۱: مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون

برای شبیه‌سازی مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون، تعیین مدل‌های مورد استفاده در نرم‌افزارهای فوق و پارامترهای مرتبط با آن‌ها ضروری است؛ لذا ابتدا، اطلاعات مورد نیاز جریان‌های خوراک و محصول مدار جمع‌آوری شد؛ سپس تابع انتخاب و تابع شکست نمونه خوراک آسیا و توزیع زمان ماند مواد داخل آسیا تعیین گردید. همچنین پارامترهای عملیاتی هیدروسیکلون و ضرایب مدل‌های موجود برای هیدروسیکلون محاسبه شدند. آن‌گاه دقت شبیه‌سازی مدار آسیای سه‌چاهون، با نرم‌افزارهای فوق، با یکدیگر مقایسه شدند.

در ادامه، مراحل شبیه‌سازی مدار آسیا به وسیله نرم‌افزارهای MODSIM، COMSIM و BMCS، به ترتیب، ارائه شدند.

## ۲- شبیه‌سازی با نرم افزار MODSIM

در نرم افزار MODSIM برای شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای و هیدروسیکلون، چندین مدل وجود دارد. از این رو آسیای گلوله‌ای و هیدروسیکلون به صورت جداگانه، با مدل‌های مختلف، شبیه‌سازی شدند و مدلی که دقت شبیه‌سازی بالاتری داشت برای هر یک از این دو واحد انتخاب شد.

شبیه‌سازی جریان خروجی از آسیای گلوله‌ای در نرم‌افزار MODSIM با مدل‌های GML، MILL، GMSU و GMSU انجام شد. توزیع دانه‌بندی شبیه‌سازی شده، با استفاده از مدل GMSU، به نتایج تجزیه سرنندی محصول آسیای سه‌چاهون نزدیک‌تر بود. هرچند مدل‌های دیگر نیز دقت مناسبی داشتند. مدل برای آسیای گلوله‌ای بر اساس روش بزرگ مقیاس کردن آستین تعریف شده است و از مدل «مخلوط کننده کامل» استفاده می‌کند [۲]. برای کاربرد این مدل، تعیین پارامترهای توابع انتخاب و شکست با روش‌های آزمایشگاهی و همچنین دسترسی به ابعاد آسیای صنعتی مورد نظر ضروری است.

در ادامه، توابع انتخاب و شکست توضیح داده شده‌اند و پارامترهای توابع شکست و انتخاب آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون تعیین شده‌اند. همچنین پارامترهای مدل‌های هیدروسیکلون سه‌چاهون و مدل‌های توزیع زمان ماند آسیای گلوله‌ای محاسبه شده‌اند.

## ۲-۱- توابع شکست و انتخاب

برای مدل‌سازی آسیاها، تعیین توابع شکست و انتخاب بار ورودی به آسیا الزامی است. از بین مدل‌های مختلف ارائه شده می‌توان به مدل تجربی تابع شکست و مدل تابع انتخاب آستین اشاره کرد. محاسبه پارامترهای این مدل‌ها برای بعضی از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، مانند MODSIM، ضروری است.

## مدل تجربی تابع شکست

مشهورترین مدل‌های تجربی تابع شکست بر مبنای این اصل است که عمدتاً ذرات بر اساس دو مکانیزم شکاف برداشتن و سایش خرد می‌شوند. هرکدام از این دو مکانیزم دارای توزیع تجمعی است که می‌تواند با رابطه زیر مدل شود [۳]:

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

در این معادله،  $x$  معرف توزیع ابعاد محصول و  $y$  نشان دهنده ابعاد اولیه ذرات است و  $\varphi$  نسبت بخش ریزدانه در کل محصول

آسیاهای عملیاتی همیشه توزیعی از اندازه گلوله‌ها را شامل می‌شوند. در این موارد بزرگ مقیاس کردن متناسب با جرم گلوله‌ها در هر اندازه است:

$$k(d_p) = S_1 d_p^\alpha \sum \frac{m_k \left(\frac{d_T}{d_k}\right)^{N_0}}{1 + \left(\frac{d_p}{\mu_k}\right)^\Lambda} \quad (5)$$

که  $d_k$  قطر معرف  $k$ امین طبقه از اندازه گلوله و  $m_k$  بخش جرمی آن طبقه از گلوله در شارژ آسیا است. در این رابطه  $N_0$  معادل  $1/0$  و  $\mu_k$  نیز طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{\mu_k}{\mu_{kT}} = \left(\frac{D_m}{D_{mT}}\right)^{N_2} \left(\frac{d_k}{d_T}\right)^{N_3} \quad (6)$$

مقادیر پیشنهادی ثابت‌های  $N_2$  و  $N_3$  به ترتیب معادل  $0.2$  و  $1/0$  هستند.

برای آسیاهای که قطر آن‌ها از  $3/81$  متر بزرگ‌تر است، برای بزرگ مقیاس کردن  $S_1$ ، ضریب  $\left(\frac{3.91}{D_m}\right)^{0.2}$  نیز به کار می‌رود [4]، [5].

## ۲-۲- تعیین پارامترهای توابع شکست و انتخاب آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون

آزمایش‌های تابع شکست با استفاده از آسیای استاندارد باند بر روی بخش‌های ابعادی خوراک آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون انجام شد. تابع شکست و تابع انتخاب آزمایشگاهی برای یازده بخش موجود (سرندهای  $1180$  تا  $38$  میکرون) به کمک نرم-افزار BFDS محاسبه گردید [4]، [6].

پارامترهای معادله برادبنت و کالکات (معادله ۱) با استفاده از نرم افزار BFDS و به سه روش بروبه، "هریست و فورستنا" و روش "هریست و فورستنا اصلاح شده" به دست آمد. مقادیر متوسط این پارامترها شامل؛  $\gamma$  و  $\beta$ ، به ترتیب  $0.91$  و  $4/91$  محاسبه گردیدند. با برازش معادله ۲ بر مقادیر متفاوت  $\varphi$  دیگر پارامترهای مورد نیاز این مدل،  $\varphi_3$  و  $\delta$ ، به ترتیب  $0.91$  و  $0.12$ - تعیین شدند [6].

با استفاده از منحنی برازش داده شده بر داده‌های تابع انتخاب آزمایشگاهی خوراک آسیای گلوله‌ای و روش ترسیمی پارامترهای مدل آستین محاسبه شد، که در جدول ۱ منعکس شده است.

است. در صورتی که داده‌های آزمایشگاهی نرمال نباشند، ضریب  $\varphi$  باید به صورت تابعی از اندازه ذره تعیین شود. این اثر معمولاً با یک تابع نمایی معکوس بیان می‌شود.

$$\varphi(y) = \varphi_0 \left(\frac{y_0}{y}\right)^\delta \quad (2)$$

که  $y_0$  اندازه ذره مرجع است، که معمولاً  $5$  میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود [4].

## مدل آستین برای تابع انتخاب

آستین تغییرات نرخ ویژه شکست (تابع انتخاب) را بر اساس تغییر اندازه ذره، با تابع زیر نشان داده است:

$$k(d_p) = \frac{S_1 d_p^\alpha}{1 + \left(\frac{d_p}{\mu}\right)^\Lambda} \quad (3)$$

در این تابع  $k(dp)$  نرخ شکست بر حسب  $\text{min}^{-1}$  اندازه ذره بر حسب میلی‌متر،  $S_1$  مقدار تابع انتخاب برای ذرات با اندازه  $1$  میلی‌متر است.  $\mu$ ،  $\Lambda$  و  $\alpha$  نیز پارامترهای مدل هستند که با رسم نمودار  $k(dp)$  در مقابل  $dp$  قابل محاسبه هستند [4]، [5].

پارامترهای  $\alpha$  و  $\Lambda$  در مدل تابع انتخاب آستین وابسته به جنس ماده معدنی فرض شده‌اند. در حالی که پارامترهای  $S_1$  و  $\mu$  به مشخصات هندسی آسیا بستگی دارند.

برای استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی آسیاهای صنعتی، باید از قوانین بزرگ مقیاس کردن استفاده کرد. رابطه تجربی زیر برای بزرگ مقیاس کردن پارامتر  $S_1$  ارائه شده است:

$$\frac{S_1}{S_{1T}} = \left(\frac{D_m}{D_{mT}}\right)^{N_1} \left(\frac{1 + 6.6J_T^{2.3}}{1 + 6.6J^{2.3}}\right) \left(\frac{\varphi_c - 0.1}{\varphi_{cT} - 0.1}\right) \left(\frac{1 + \exp[15.7(\varphi_{cT} - 0.94)]}{1 + \exp[15.7(\varphi_c - 0.94)]}\right) \exp(-c(u - u_T)) \quad (4)$$

در این رابطه،  $D_m$  قطر آسیا،  $db$  اندازه گلوله‌ها و  $\varphi_c$  نسبت سرعت بحرانی است. زیرنویس  $T$  مربوط به متغیرهای تعیین شده در شرایط آزمایشگاهی است.  $J$  نسبت پرشدگی آسیا و  $u$  بخشی از فضای خالی بار آسیا است که به وسیله پالپ پر شده است. پارامتر  $\mu$  با بالا رفتن اندازه گلوله و توان آسیا افزایش می‌یابد. در این رابطه،  $C$  معادل  $1/3$  و  $N_1$  برابر  $1/0$  در نظر گرفته شده است.

## ۲-۳- تعیین پارامترهای مدل‌های هیدروسیکلون

شبیه‌سازی هیدروسیکلون با مدل‌های Cyca، Cyel و Nage در نرم افزار MODSIM انجام شد. مدل‌های Cyca و Nage همان مدل‌های پلیت و ناگسواراؤ هستند [۷] و مدل Cyca نیز مدل تجربی عمومی کلاسیفایرها است، که در آن منحنی جدایش تصحیح شده، با یکی از روش‌های مدل لینچ، تابع روزین-راملر یا تابع محاسبه‌ای، مدل می‌شود. پارامترهای این مدل شامل؛ میزان مواد بازگشتی، اندیس (دقت) جدایش،  $d_{50}$  تصحیح شده برای مواد با وزن مخصوص ۲/۶۷، و شاخصی برای تغییرات  $d_{50}$  تصحیح شده با دانسیته، هستند [۲]، [۸].

نتایج شبیه‌سازی شامل؛ توزیع دانه‌بندی و دبی جریان‌های سرریز و ته‌ریز، با دو مدل Cyca و Cyel به نتایج نمونه-برداری‌های جریان‌های هیدروسیکلون سه‌چاهون نزدیک بود. به این منظور، از خوراک و محصولات هیدروسیکلون نمونه‌برداری شد و منحنی کارایی جدایش هیدروسیکلون ترسیم گردید. از روی این منحنی و داده‌های عملیاتی موازنه شده، مقادیر واقعی پارامترهای کارایی محاسبه شد. جدول ۴ مقادیر پارامترهای کارایی تعدادی از نمونه‌ها و متوسط ۱۳ نمونه گرفته شده را نشان می‌دهد. با محاسبه پارامترهای مدل‌های پلیت و ناگسواراؤ و مقایسه با مقادیر واقعی پارامترها، ضرایب کالیبراسیون مدل‌های فوق مطابق جداول ۵ و ۶ محاسبه شدند.

جدول ۴: مقادیر واقعی پارامترهای کارایی

نمونه	$d_{50c}$ ( $\mu\text{m}$ )	تقسیم جریان (S)	دقت جدایش (m)	Sharpness index (SI)
S1	۸۵	۰/۰۹۵	۲/۵۸۴	۰/۵۸
S2	۱۳۴	۰/۱۳۴	۲/۰۴۵	۰/۶۹
S3	۱۴۳	۰/۱۰۶	۲/۱۲۲	۰/۵۰
S4	۱۱۶	۰/۱۶۶	۱/۵۷۸	۰/۳۵
متوسط	۱۲۴	۰/۱۵۶	۲/۱۰۴	۰/۵۰

جدول ۵: ضرایب کالیبراسیون مدل پلیت

مقدار	پارامترها
$k_1=1/15$	حد جدایش اصلاح شده ( $\mu\text{m}$ )
$k_2=2/70$	افت فشار (kPa)
$k_3=1/40$	تقسیم جریان
$k_4=0/60$	دقت جدایش

جدول ۱: پارامترهای تابع انتخاب محاسبه شده به روش آستین

پارامترها	مقادیر
$S_1$	۱۲/۵ (1/min)
$\alpha$	۱/۱۴
$\Lambda$	۲/۰۱
$\mu$	۰/۴۰۰ (mm)
$d_{pmax}$	۰/۴۵۷ (mm)

پارامتر  $S_1$  برای آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون با استفاده از رابطه ۴ و مشخصات آسیاهای صنعتی و آزمایشگاهی (جدول ۲)، بزرگ مقیاس شد و معادل ۰/۹۸ بدست آمد.

جدول ۲: داده‌های موردنیاز برای بزرگ مقیاس کردن پارامتر  $S_1$  در مدل تابع انتخاب آستین برای خوراک آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون

پارامترها	مقادیر	پارامترها	مقادیر
$D_{mT}$	۰/۳۰۵ m	$D_m$	۴/۵ m
$J_T$	۰/۱۴	J	۰/۳۵
$U_T$	۰/۰۰۰۷۷	U	۱/۷۲۵
$\phi_{cT}$	۰/۷۸۳	$\phi_c$	۰/۷۵۶
$S_{1T}$	۱/۷		

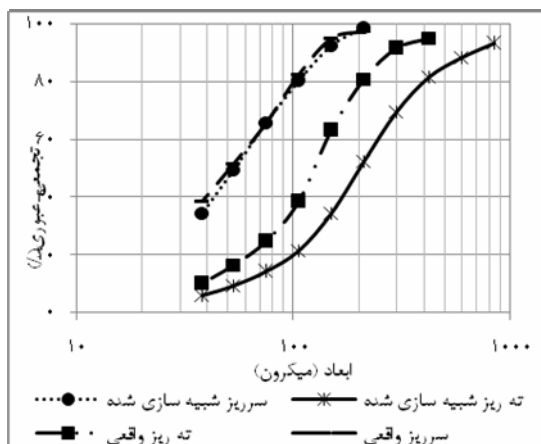
برای بزرگ مقیاس کردن  $\mu$ ، مقادیر  $\mu_k$  با توجه به توزیع ابعادی گلوله‌ها در آسیای سه‌چاهون (جدول ۳) و با در نظر گرفتن  $d_1=42$  mm و  $\mu_{kT}=0.400$  mm، به کمک رابطه ۶ محاسبه شد.

جدول ۳: ترکیب گلوله‌ها در آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون و  $\mu_k$ 

محاسبه شده برای آنها

اندازه گلوله (mm)	درصد وزنی	$\mu_k$ هر بخش (mm)
۵۰	۴۴/۳۵	۰/۶۳۴
۴۰	۳۵/۴۱	۰/۷۶۱
۳۰	۱۸/۱۲	۱/۰۱۵
۲۵	۲/۱۲	۱/۲۶۹

با قرار دادن مقادیر  $S_1$  و  $\mu_k$  بزرگ مقیاس شده، در رابطه (۵)، تابع انتخاب بزرگ مقیاس شده به روش آستین به دست آمد. با رسم نمودار تابع انتخاب صنعتی نسبت به اندازه ذره، و با روش ترسیمی مقدار " $\mu$  بزرگ مقیاس شده" معادل ۱/۰۱۶ میلی‌متر محاسبه شد.



شکل ۲: مقایسه توزیع ابعادی سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون سه چاهون با نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار MODSIM

### ۳- شبیه‌سازی با نرم‌افزار COMSIM

نرم‌افزار COMSIM برای شبیه‌سازی مدار آسیا ارائه شده است و در محیط Excel اجرا می‌شود. برای شبیه‌سازی مدار آسیا با این نرم‌افزار، تعیین توابع انتخاب و شکست آزمایشگاهی الزامی است. همچنین باید توزیع ابعادی، دبی و درصد جامد خوراک ورودی به مدار، به نرم‌افزار داده شود. از دیگر ورودی‌های مورد نیاز پارامترهای توزیع زمان ماند بر اساس مدل ولر است. برای شبیه‌سازی هیدروسیکلون موجود در مدار باید مشخصات هیدروسیکلون و ضرایب کالیبراسیون مدل پلیت به نرم‌افزار وارد شوند. از آن جا که در مدارهای پیش‌فرض این نرم‌افزار، فلوشیتی مشابه مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون (شکل ۱) وجود ندارد، شبیه‌سازی آسیا و هیدروسیکلون به‌طور مجزا انجام شد. ابتدا آسیا با خوراک موجود (داده‌های موازنه شده) شبیه‌سازی شد. سپس اطلاعات محصول شبیه‌سازی شده آسیا و باطله برگشتی به روش موازنه وزنی با هم ترکیب و به‌عنوان جریان خوراک در شبیه‌سازی هیدروسیکلون استفاده شد. در ادامه از ترکیب ته‌ریز شبیه‌سازی هیدروسیکلون و خوراک تازه مدار، جریانی ساختگی به‌عنوان خوراک در شبیه‌سازی آسیا استفاده شد. این کار تا رسیدن به حالت پایدار ادامه یافت. نتایج دبی و توزیع ابعادی جریان‌های شبیه‌سازی شده و پارامترهای مدل پلیت به ترتیب در جدول ۸، شکل ۳ و جدول ۹ مشخص شده است.

جدول ۶: ضرایب کالیبراسیون مدل ناگسوارارائو

مقدار	ضریب
$K_{Q_0} = 172/2$	عدد اولیور
$K_{D_0} = 0/00027$	حد جدایش اصلاح شده ( $\mu m$ )
$K_{w_0} = 34/84$	بازیابی آب در ته‌ریز
$K_{v_0} = 3/46$	بازیابی پالپ در ته‌ریز

### ۴-۲- توزیع زمان ماند مدار آسیا

برای شبیه‌سازی آسیا، تعیین تابع توزیع زمان ماند ضروری است. در این تحقیق، پارامترهای توزیع زمان ماند برای مدل-های ولر، و "n مخلوط کننده کامل"، با اضافه کردن نمک طعام به شاخه خوراک تازه مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون تعیین گردید. به این منظور، هدایت الکتریکی نمونه‌های گرفته شده از شاخه‌های مختلف، در بازه‌های زمانی ۲ تا ۳ دقیقه، (در مدت زمان یک ساعت)، اندازه‌گیری شد و به کمک نرم‌افزار RTDWN [۹]، مطابق جدول ۷ محاسبه گردید.

جدول ۷: پارامترهای توزیع زمان ماند مدار آسیای گلوله‌ای خط سه

چاهون محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزار RTDWN

نوع مدل			
ولر		N مخلوط کامل	
۱۶/۲	K	۱۷/۰۲	K
۴/۳۳	$T_{pf}$	۱/۰۷	$T_{pf}$
۲/۰۴	$T_s$	۹/۴۲	T
۲/۴۲	$T_l$	۷	N
۱۰/۸۳	زمان ماند متوسط	۱۰/۵	زمان ماند متوسط
۰/۱	مجموع مربعات	۰/۱	مجموع مربعات
٪۱۷	درصد خطا	٪۱۶	درصد خطا

### ۵-۲- شبیه‌سازی مدار آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون

با توجه به نتایج مراحل قبل، در شبیه‌سازی مدار بسته آسیای گلوله‌ای از مدل GMSU برای آسیا و مدل Cyca برای هیدروسیکلون استفاده شد. پارامترهای مورد نیاز مدل GMSU شامل: پارامترهای توابع شکست و انتخاب، توزیع زمان ماند، توزیع گلوله‌ها و مشخصات آسیا است، که قبلاً به آن‌ها اشاره شده است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده در مدار آسیا، در جدول ۸ و شکل ۲ نشان داده شده است.

#### ۴- شبیه‌سازی با نرم‌افزار BMCS

نرم‌افزار BMCS قادر به شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای در مدار باز و بسته با هیدروسیکلون است. در این نرم‌افزار از مدل‌های «موازنه جمعیتی» و پلیت استفاده شده است [۱۰]. داده‌های ورودی به این نرم‌افزار، مشابه نرم‌افزار COMSIM است. در این نرم‌افزار به علت عدم وجود مدارهای پیش فرض مورد نظر، ماتریس ارتباط مدار در نرم‌افزار تعریف گردید و شبیه‌سازی مدار با آن انجام گرفت. جدول ۸ تناژ و درصد جامد جریان‌های مختلف مدار حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. توزیع ابعادی جریان‌های شبیه‌سازی شده در شکل ۴ آمده است و پارامترهای شبیه‌سازی شده مدل پلیت نیز در جدول ۹ مشخص شده است.

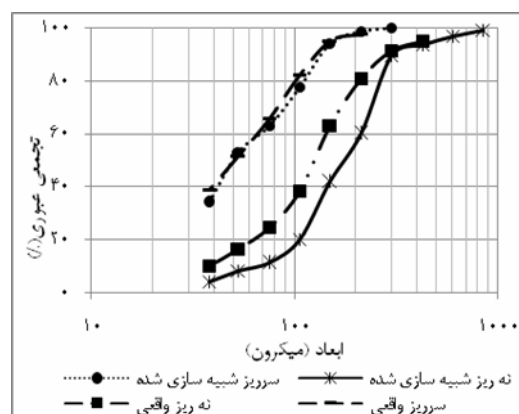
#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نتایج شبیه‌سازی مدار آسیای گلوله‌ای سه-چاهون، به کمک نرم‌افزارهای MODSIM، BMCS و COMSIM با داده‌های اندازه‌گیری شده در مدار مقایسه شده-اند. برای محاسبه پارامترهای مورد نیاز در نرم‌افزارهای فوق، ابتدا توزیع ابعادی جریان‌های خوراک و محصول، درصد جامد و دبی جریان‌ها، با نمونه‌گیری و موازنه جرمی، تعیین گردیده است؛ سپس تابع انتخاب و تابع شکست خوراک با انجام یافتن آزمایش‌های تعیین قابلیت خردایش و به کمک نرم‌افزار BFDS محاسبه شده‌اند. در ادامه، پارامترهای مدل تجربی تابع شکست و تابع انتخاب آستین تعیین گردیده است. آن‌گاه، توزیع زمان ماند مواد داخل آسیا (به کمک نرم‌افزار RTDWEN) اندازه‌گیری شده است؛ سپس پارامترهای عملیاتی هیدروسیکلون و ضرایب مدل‌های پلیت و ناگسواراژو نیز برای هیدروسیکلون تعیین شده‌اند.

بعد از تعیین پارامترهای مورد نیاز، مدار آسیای گلوله‌ای به وسیله نرم‌افزارهای MODSIM، BMCS و COMSIM شبیه‌سازی شده است. برای مقایسه نتایج توزیع ابعادی شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده، از «میانگین خطای استاندارد» استفاده شده است. مقایسه درصد خطای شبیه‌سازی‌ها در جدول ۱۰ آمده است. کمترین خطای استاندارد، در پیش‌بینی توزیع ابعاد خروجی آسیای گلوله‌ای، مربوط به نرم‌افزار COMSIM (۰/۵۶٪) و بیشترین مقدار آن مربوط به نرم‌افزار BMCS (۰/۹۸٪) بود. مقایسه دقت نرم‌افزارها در مورد توزیع ابعادی سرریز هیدروسیکلون نشان می‌دهد که نرم‌افزار

جدول ۸: مقایسه تناژ و درصد جامد جریان‌های مختلف اندازه‌گیری شده در مدار با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی

توزیع سیکلون	سرریز سیکلون	خوراک سیکلون	خروجی آسیا	اندازه‌گیری شده	
۱۴۴/۳	۲۰۴/۲	۳۵۰/۷	۳۴۸/۳	جامد (t/h)	۱۴۴/۳
۷۲/۳	۳۰/۶	۴۰/۶	۶۷/۰	درصد جامد	۷۲/۳
۱۴۶/۵	۲۰۴/۲	۳۵۰/۷	۳۴۸/۳	جامد (t/h)	۱۴۶/۵
۷۵/۱	۳۰/۶	۴۰/۷	۶۷/۰	درصد جامد	۷۵/۱
۱۷۵/۹	۲۰۴	۳۷۹/۹	۳۷۷/۵	جامد (t/h)	۱۷۵/۹
۸۰/۱	۳۰/۶	۴۲/۸	۶۹/۴	درصد جامد	۸۰/۱
۱۱۰/۷	۲۰۴/۴	۳۵۵/۴	۳۵۳/۱	جامد (t/h)	۱۱۰/۷
۷۰	۳۰/۷	۴۱/۱	۶۷/۸	درصد جامد	۷۰



شکل ۳: مقایسه توزیع ابعادی سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون با نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار COMSIM

جدول ۹: پارامترهای شبیه‌سازی شده مدل پلیت در نرم‌افزار COMSIM و BMCS

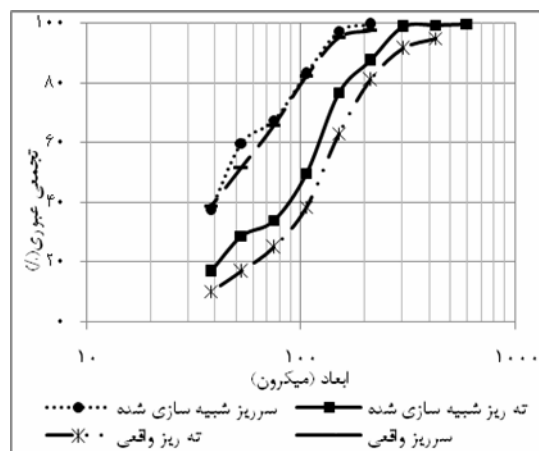
نرم‌افزار		پارامترها
BMCS	COMSIM	
۱۲۲	۱۲۸/۰۷	حد جدایش اصلاح شده (μm)
۲/۱۲	۲/۱۲	دقت جدایش
۶۶/۶۲	۶۷/۴۳	افت فشار (kPa)
۰/۱۶	۰/۱۶	تقسیم جریان
۹/۰	۸/۶۳	بازیابی مایع به ته‌ریز

نرم‌افزار MODSIM در پیش‌بینی تناژ و درصد جامد ته‌ریز هیدروسیکلون خطای نسبی کمتری دارد.

### منابع

- [1] Morrison R. D. and Richardson J.M.; 2002, "JKSimMet: A Simulator for Analysis, Optimization and Design of Comminution Circuit", Mineral Processing Plant Design, Practice and Control Proceeding, New York.
- [2] Mineral Technologies International, Inc (MTI), "Modular Simulator for Mineral Processing Plants", 8th Edition, USA, November 2004.
- [3] King R. P.; 2001, "Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems", Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [4] Gupta A. and Yan D.S.; 2006 "Introduction to Mineral Processing Design and Operation", Perth, Australia, January.
- [5] Yousefi A. A., Farzanegan, A., Irannejad, M., 2001, "Breakage Function Determination Software <BFDS>", Version 1, 0, Amirkabir University of Technology, Department of Mining and Metallurgical Eng.
- [6] پرنده، لیلا؛ دهقانی، علی؛ خسروی، مهدی؛ نوع‌پرست، محمد؛ ۱۳۸۸؛ "مقایسه تابع انتخاب آزمایشگاهی بزرگ‌مقیاس شده و تابع انتخاب صنعتی؛ مطالعه موردی، آسیای گلوله‌ای سه‌چاهون" سومین کنفرانس مهندسی معدن؛ دانشگاه یزد؛
- [7] Esmaili M.J., Solhi M. and Banisi S., 2009, "Modeling Hydrocyclone Performance Using Plitt's and Nagswararaos's Models at the Interkarbon Coal Washing Plant", Shahid Bahonar Kerman University.
- [8] Wanwilai Kraipech, Wu Chenb, Tom Dyakowskic, Andrzej Nowakowskic, 2005, "The performance of the empirical models on industrial hydrocyclone design", Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakarinwirot University Ongkharuk.
- [9] Javadi Farhad, Banisi Samad, 1997, "Residence Time Distribution Simulation Software in Open and Close Circuits", Shahid Bahonar Kerman University.
- [10] Farzanegan A., Laplant A. R., "Ball Milling Circuits Simulator <BMCS>", Version 1.1, McGill University, Dep. Of Mining and Metallurgical Engineering, Mineral Processing Group.

MODSIM، بیشترین خطا (۷/۸۳٪) را داشته است؛ ولی خطای پیش‌بینی توزیع ابعاد ته‌ریز هیدروسیکلون، با این نرم‌افزارها تقریباً مشابه است.



شکل ۴: مقایسه توزیع ابعادی سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون با نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار BMCS

جدول ۱۰: مقایسه درصد خطای شبیه‌سازی مدار آسیای سه‌چاهون با نرم‌افزارهای MODSIM, COMSIM و BMCS

MODSIM	COMSIM	BMCS	
۰/۶۱	۰/۵۶	۰/۹۸	ابعاد خروجی آسیا
۷/۸۳	۰/۹۶	۱/۱۸	ابعاد سرریز سیکلون
۰/۰۸	۰	۰/۱۹	تناژ جامد سرریز
۰/۰۷	۰/۱۶	۰/۱۳	درصد جامد سرریز
۳/۰۲	۳/۲۷	۲/۲۲	ابعاد ته‌ریز سیکلون
۱/۵۴	۲/۱۹	۲۳/۳۱	تناژ جامد ته‌ریز
۰/۲۷	۶/۳۸	۷/۰	درصد جامد ته‌ریز

شبیه‌سازی تناژ و درصد جامد سرریز هیدروسیکلون با دقت بسیار خوبی در هر سه نرم‌افزار انجام شده است. نرم‌افزار MODSIM، تناژ و درصد جامد ته‌ریز هیدروسیکلون را با دقت خوبی محاسبه کرده است؛ ولی خطای دو نرم‌افزار دیگر نسبتاً زیاد بوده است.

نتایج این بررسی نشان می‌دهد که هر سه نرم‌افزار بررسی شده، با دقت قابل قبولی قادر به شبیه‌سازی مدار آسیای گلوله-ای سه‌چاهون هستند. نرم‌افزارهای BMCS و COMSIM که بر مبنای مدل‌های مشابه توسعه داده شده‌اند، به‌خوبی قادر به پیش‌بینی توزیع دانه‌بندی جریان‌های مختلف مدار هستند؛ ولی

