

شبیه‌سازی آسیاهای میله‌ای در محیط *BMCS*

اکبر فرزنانگان^{۱*}، علیرضا ولیان^۲، زینب سادات میرزائی^۳

۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران؛ Email: farzanegan@ut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان؛ Email: a.valian@farakap.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان؛ Email: mirzaei@farakap.com

(دریافت ۴ مهر ۱۳۸۹، پذیرش ۲۷ بهمن ۱۳۸۹)

چکیده

امروزه استفاده از آسیاهای میله‌ای در طراحی‌های جدید مدارهای خردایش منسوخ شده است. با این حال، آسیاهای میله‌ای بسیاری در کارخانه‌های فرآوری در کشور وجود دارند که به دلایل مختلف عملکرد آنها می‌باید بهینه‌سازی شود. نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، ابزارهایی تخصصی برای طراحی و بهینه‌سازی فرآیند می‌باشند. مدل‌سازی ریاضی فرآیند خردایش در آسیاهای میله‌ای به دلیل «اثر غربالگری» در این نوع آسیاها به طور کلی متفاوت از مدل‌سازی ریاضی آسیاهای گلوله‌ایست. در این پژوهش، الگوریتم شبیه‌سازی عملکرد آسیاهای میله‌ای بر اساس مدل‌های ریاضی تثبیت‌شده در منابع معتبر خردایش توسعه داده شد و این قابلیت به عنوان یک ماژول جدید به برنامه (*BMCS*) (*BMCS-Based Modular Comminution Simulator*) اضافه شد. مدل ریاضی مورد استفاده در شبیه‌سازی آسیای میله‌ای، مدل ماتریسی است که بر اساس تعریف مراحل متوالی خردایش توسعه یافته است. در هر یک از این مراحل متوالی خردایش، عمل انتخاب، خردایش و طبقه‌بندی انجام می‌شود. الگوریتمی که ماژول آسیای میله‌ای *BMCS* از آن پیروی می‌کند، در این مقاله به تفصیل توضیح داده شده است. در این پژوهش، ماژول جدید با یک مجموعه داده مورد آزمایش قرار گرفت. مقایسه توزیع اندازه ذره پیش‌بینی‌شده محصول آسیای میله‌ای توسط نرم‌افزار *BMCS* با توزیع اندازه ذره اندازه‌گیری‌شده محصول، اعتبار مدل ریاضی مورد استفاده و پیاده‌سازی صحیح آن را به خوبی تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی

مدل‌سازی، شبیه‌سازی، آسیای میله‌ای، *BMCS*

۱- مقدمه

شبیه‌سازی فرآیندی است که طی آن، عملکرد یک مدار یا قسمتی از آن توسط یک نرم‌افزار رایانه‌ای پیش‌بینی می‌شود. نرم‌افزار شبیه‌ساز از مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی رفتار هر دستگاه استفاده می‌کند. مدل‌های ریاضی مجموعه روابط ریاضی می‌باشند که رفتار یک دستگاه خاص را توضیح می‌دهند.

آسیای میله‌ای، که شبیه‌سازی آن در این پژوهش مد نظر است، از انواع آسیاهای گردان است که واسطه خردایش در آنها میله‌هایی فولادی است. این میله به صورت طولی و موازی هم درون آسیا قرار می‌گیرند. نسبت طول به قطر این آسیا ۱۵ تا ۲۵ است و معمولاً با سرعتی میان ۵۰ تا ۶۰ درصد سرعت بحرانی خود در دورانند. درصد جامد پالپ خوراک معمولاً میان ۶۵ تا ۸۵ درصد وزنی است که هرچه خوراک ریزتر باشد، باید درصد جامد کمتری داشته باشد. مکانیزم اصلی شکست در آسیاهای میله‌ای، شکست ضربه‌ای است. ممکن است شکست سایشی هم روی دهد (به عنوان مثال در مورد ذرات گیرکرده میان میله‌ها و لاینر در منطقه «بالابری» از توده میله‌ها) اما این بخش کوچکی از کل فرآیند شکست است [۱]، [۲].

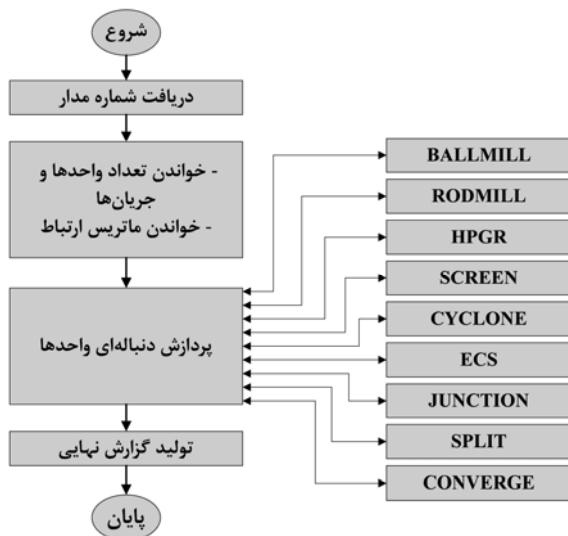
در طراحی‌های جدید مدارهای آسیاکنی، استفاده از آسیای میله‌ای به نوعی منسوخ شده است؛ اما هنوز آسیاهای میله‌ای در حال کار بسیاری وجود دارند که به توجه مهندسان نیاز دارد. انجام مطالعات بهینه‌سازی بر روی مدارهای شامل آسیای میله‌ای، به علت فرسوده بودن آنها، از توجه بالایی برخوردار است. شبیه‌سازی آسیای میله‌ای به عنوان یکی از ماژول‌های BMCS، امکان بهینه‌سازی مدارهای آسیاکنی شامل آسیای میله‌ای را فراهم می‌کند. در این پژوهش قابلیت شبیه‌سازی آسیای میله‌ای به این نرم‌افزار اضافه می‌شود و BMCS به نسخه پنجم ارتقا می‌یابد.

۲- آشنایی با BMCS

BMCS نام اختصاری بازگشتی برای بسته نرم‌افزاری BMCS-Based Modular Comminution Simulator است. در این عبارت، BMCS خود حروف اختصاری است و به برنامه Ball Milling Circuits Simulator اشاره می‌کند که هسته اولیه نسخه‌های جدید BMCS محسوب می‌شود [۳]. نامگذاری اولیه به این دلیل بوده است که نخستین ماژول BMCS به منظور شبیه‌سازی مدارهای آسیای گلوله‌ای توسعه یافت. پس از نسخه اولیه برنامه، به تدریج ماژول‌های دیگری برای شبیه‌سازی دستگاه‌های خردایشی متفاوت که در فرآوری

مواد معدنی کاربرد دارند، توسعه داده شده و به ساختار شبیه‌ساز اضافه شده‌اند. واحدهایی که نسخه پنجم BMCS قادر به شبیه‌سازی آنهاست عبارتند از: (۱) آسیای گلوله‌ای، (۲) آسیای میله‌ای، (۳) غلتک‌های آسیاکنی فشار بالا، (۴) سرندها، چند طبقه صنعتی، (۵) هیدروسیکلون، (۶) جداکننده هوایی بر اساس منحنی جدایش، (۷) نقطه تقسیم یک جریان به چند جریان، (۸) نقطه ترکیب چند جریان و تشکیل یک جریان و (۹) آزمون همگرایی در مدارهای بسته خردایش. نرم‌افزار BMCS قادر است حالت یکنواخت^۱ هر مدار دلخواه ترکیبی از واحدهای بالا را شبیه‌سازی کند.

شکل ۱ نشان‌دهنده نمودار جریان نرم‌افزار BMCS است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، این نرم‌افزار ساختار دنباله‌ای دارد؛ لذا واحدهای موجود در مدار، پشت سر هم بر اساس ماتریس ارتباط مدار توسط نرم‌افزار پردازش می‌شوند.

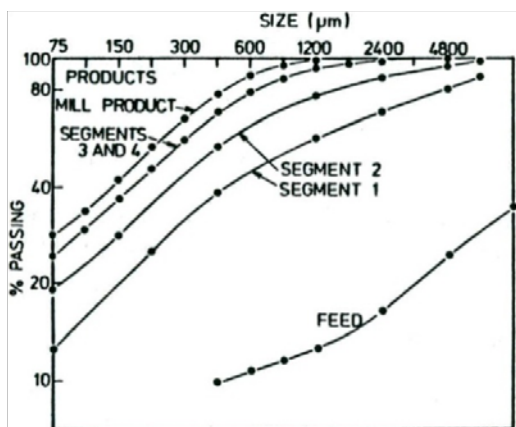


شکل ۱: نمودار عملیات BMCS

شبیه‌سازی مدارهایی که فاقد بار در گردش می‌باشند، با یک دور پردازش دنباله‌ای همه واحدها به پایان می‌رسد؛ اما در مورد مدارهایی که بار در گردش دارند، این پردازش دنباله‌ای واحدها تا دستیابی به حالت یکنواخت به صورت تکرار شونده ادامه می‌یابد.

۳- خردایش در آسیای میله‌ای و اثر غربالگری

عمل خردایش در نتیجه تماس خطی میله‌ها با کانسنگ انجام می‌شود. وجود مواد درشت‌دانه در قسمت ورودی آسیا باعث می‌شود که میله‌ها از هم فاصله بگیرند و با هم شکلی



شکل ۳: تغییرات توزیع اندازه ذرات کانسنگ از ابتدا تا انتهای آسیا [۴]

۴-۱- بیان مدل

چنانکه در بخش قبل آمد، یک آسیای میله‌ای را می‌توان به دستگاهی با مراحل یا محل‌های خردایش متوالی که در آنها هم عمل خردایش و هم عمل طبقه‌بندی انجام می‌شود، تشبیه کرد. بر این اساس، کلکات و لینچ (۱۹۶۴) یک مرحله خردایش برای یک آسیای میله‌ای را بدین صورت تعریف کردند: بازه مورد نیاز برای ناپدید شدن بزرگترین طبقه سردی از خوراک آسیا در مرحله اول و سپس بزرگترین طبقه سردی از خوراک مراحل بعدی. طبقه‌بندی موجود در هر مرحله این اطمینان را ایجاد می‌کند که هیچ ذره‌ای از بزرگترین فراکسیون ورودی به مرحله، در این فراکسیون باقی نمی‌ماند. همه ذرات بزرگترین فراکسیون اندازه باید خرد شوند و به طبقات پایین‌تر منتقل شوند [۴].

مفهومی که بر اساس آن یک مرحله تعریف می‌شود به صورت فلوشیت در شکل ۴ نشان داده شده است. در توضیح باید گفت که تابع انتخاب، بخشی از مواد را برای خرد شدن انتخاب می‌کند و بخش انتخاب‌نشده، که خرد نمی‌شود، بخشی از بردار q را تشکیل می‌دهد. قسمتی از مواد که برای خردایش انتخاب شده‌اند، تحت رفتاری که توسط تابع شکست تشریح می‌شود، خرد می‌گردند و بخش دیگر بردار q را تشکیل می‌دهند. بردار جرم q تحت فرآیند طبقه‌بندی قرار می‌گیرد که توسط ماتریس طبقه‌بندی تشریح می‌شود. قسمتی که برای بازگشت به پروسه طبقه‌بندی می‌شود، به همراه خوراکی که به این مرحله وارد می‌شود، بردار m را تشکیل می‌دهد و مجدداً تحت فرآیند انتخاب قرار می‌گیرد تا پروسه تکرار شود. خروجی دیگر فرآیند طبقه‌بندی به عنوان محصول این مرحله شناخته می‌شود.

شبهه به مخروط یا گوه بسازند (شکل ۲). در یک نقطه معین از طول آسیا، این موضوع باعث خردایش انتخابی ذرات درشت در آن نقطه و عبور برخی از ذرات ریز از میان فضای بین میله‌ها بدون خرد شدن در آن نقطه و حرکت آنها به سمت خروجی آسیا می‌شود که از آن معمولاً به عنوان «اثر غربالگری^۲ یا طبقه‌بندی داخلی^۳» در آسیاهای میله‌ای نام برده می‌شود [۱]، [۴].



شکل ۲: اثر غربالگری میله‌ها در آسیا

ماده معدنی با حرکت در طول آسیای میله‌ای، تحت اثر مراحل متوالی شکست و طبقه‌بندی قرار می‌گیرد و در این روند به‌طور ممتد، مواد درشت‌تر ناپدید می‌شوند. این موضوع با تعیین توزیع اندازه ذرات در مقاطع طولی یک آسیای میله‌ای پیوسته به ابعاد دو متر در دو متر نشان داده شده است. توزیع اندازه متوسط در هر مقطع در شکل ۳ نشان داده شده است.

پدیده غربال شدن ذرات چنان که در شکل ۲ نشان داده شده است، به این دلیل رخ می‌دهد که کانسنگ باید همراه با حرکت به سمت خروجی آسیا، از سرندهایی فرضی که به‌طور مداوم اندازه چشمه‌های آنها کم می‌شود، عبور نماید [۴].

اثر غربالگری باعث می‌شود توزیع اندازه محصول در بازه کوچکی قرار گیرد که در آن مقدار دانه‌های بیش از اندازه بزرگ و همچنین نرمه کم است. بنابراین آسیاهای میله‌ای برای آماده‌سازی خوراک برای پری‌عیارسازهای ثقلی و مغناطیسی، فرآیند فلوتاسیون با مشکل نرمه و آسیاهای گلوله‌ای مناسب می‌باشند. به علت همین کاهش اندازه کنترل‌شده، آسیاهای میله‌ای تقریباً همیشه در مدار باز عمل می‌کنند [۴].

۴- مدل‌سازی ماتریسی آسیای میله‌ای

شیوه قرار گرفتن میله‌ها درون یک آسیای میله‌ای به شکلی است که از اختلاط مواد، همانند آنچه که در یک آسیای گلوله‌ای رخ می‌دهد، جلوگیری می‌کند. بنابر این فرض، جریان قالبی برای این الگوی زمان اقامت مناسب‌تر از مدل‌های مبتنی بر اختلاط کامل است [۵، ۶]. مدلی که در ادامه معرفی می‌شود بر این فرض استوار است که عبور مواد از آسیا به صورت جریان قالبی است. بنابراین مدل ماتریسی برای خردایش توسط یک آسیای میله‌ای به صورت پیوسته یا ناپیوسته قابل استفاده است.

حداکثر تعداد مراحل خریدایش برابر است با تعداد عناصر بردار خوراک یا همان تعداد طبقات سرندی بدون برشمردن سینی. به عنوان مثال، اگر توزیع اندازه ذرات خوراک آسیا با ۹ طبقه سرندی (بدون سینی) نمایش داده شود، نمی توان عملکرد آسیا را با بیش از ۹ مرحله نمایش داد؛ چرا که در مرحله نهم تمام خوراک به سینی وارد می شود.

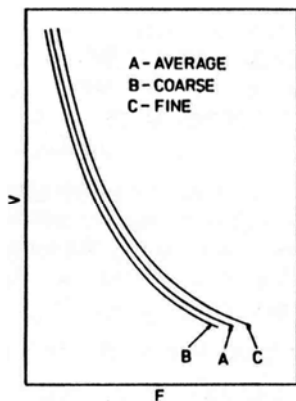
۴-۲- به مقیاس کردن تعداد مراحل شکست

تعداد مراحل شکست در یک فرآیند آسیاکنی بیانگر میزان پیشرفت فرآیند خریدایش است و ارتباط نزدیکی با زمان اقامت در آسیا دارد. در حقیقت در این مدل، اثر تغییر در زمان اقامت مواد به صورت تغییر در تعداد مراحل شکست دیده می شود. تعداد مراحل شکست به نرخ خوراک بستگی دارد و رابطه آنها برای اندازه ثابت خوراک به صورت شکل ۵ است. چنان که در این شکل نشان داده می شود، با تغییر اندازه خوراک، این رابطه کمی جابه جا می شود.

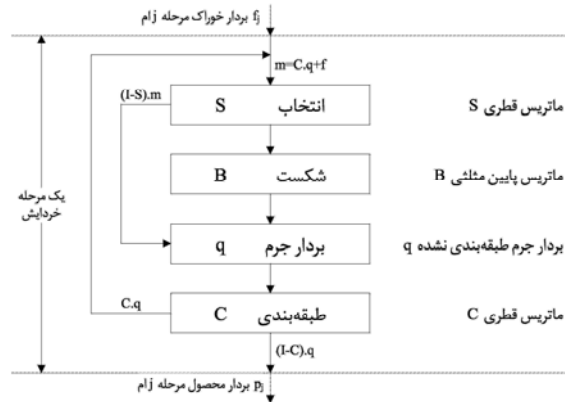
مشخص شده است که در محدوده عادی عملکرد آسیاهای میله ای، رابطه ۷ تقریباً درست است و رفتار منحنی های شکل ۵ را تشریح می کند [۴]، [۶].

$$Q.(v)^{1.5} = MC \quad (7)$$

که در آن Q نرخ خوراک، v تعداد مراحل شکست و MC ثابت آسیا می باشند. ثابت آسیا برای یک آسیای میله ای خاص که در حال خرد کردن یک کانسنگ خاص است، در هر شرایط عملیاتی تقریباً ثابت است. از این رابطه برای به مقیاس کردن تعداد مراحل شکست بر اساس نرخ خوراک استفاده می شود.



شکل ۵: شکل کلی رابطه نرخ خوراک - تعداد مراحل شکست [۴]



شکل ۴: فلوشیت یک مرحله از خریدایش در آسیای میله ای

برای به دست آوردن توضیح ریاضی شکل ۴ لازم است که محصول به صورت تابعی از توزیع ابعاد خوراک، به دست آورده شود. از شکل ۴ روابط ۱ تا ۳ نوشته می شود.

$$p = (I - C).q \quad (1)$$

$$q = (I - S).m + B.S.m \quad (2)$$

$$m = C.q + f \quad (3)$$

در این روابط، I ، B ، C و S به ترتیب بیانگر ماتریس های همانی، شکست، طبقه بندی و انتخاب می باشند که در بخش های ۴-۳ تا ۵-۴ تشریح می شوند. همچنین در این روابط، f و p به ترتیب بردار خوراک مرحله، بردار محصول مرحله و بردار محصول پیش از طبقه بندی شدن تحت اثر ماتریس می باشند.

اگر از روابط ۱ تا ۳، m و q حذف شوند، رابطه ۴ به دست می آید که با استفاده از آن می توان با داشتن خوراک هر مرحله، محصول آن را محاسبه نمود.

$$p = (I - C).(I - S + B.S).[I - C.(I - S + B.S)]^{-2}.f \quad (4)$$

بنابراین ماتریس انتقال خوراک مرحله i ام به محصول آن، به صورت رابطه ۵ نوشته می شود و محصول نهایی آسیا (پس از v مرحله خریدایش) از رابطه ۶ به دست می آید [۴].

$$X_i = (I - C).(I - S + B.S).[I - C.(I - S + B.S)]^{-1} \quad (5)$$

$$P = \left[\prod_{j=2}^{j=v} \right] X_j.f \quad (6)$$

در روابط بالا، X_j بیانگر ماتریس انتقال خوراک مرحله به محصول آن، v نشان دهنده تعداد مراحل شکست و P محصول نهایی پس از v مرحله خریدایش است.

۳-۴- ماتریس تابع شکست

ماتریس تابع شکست (B)، یک ماتریس مربعی پایین مثلثی شامل مقادیر تابع شکست کانسنگ است. واضح است که تابع شکست مواد مختلف یکسان نیست اما این امکان وجود ندارد که یک مقدار منحصر به فرد برای تابع شکست یک ماده معدنی به دست آورد. جایگزین استفاده از مقادیر یگانه تابع شکست این است که تابع شکست ثابت فرض شود و تابع انتخاب برای توضیح تغییرات مختلف در فرآیند تغییر کند. مقادیر این ماتریس تابع شکست ثابت را می‌توان با استفاده از رابطه ۸ که توسط بردابنت و کلکات پیشنهاد شده است، به دست آورد [۴].

$$B_{xy} = (1 - e^{-(x/y)}) / (1 - e^{-1}) \quad (8)$$

که در آن y اندازه طبقه سرندي مادر و x اندازه طبقه سرندي مورد نظر است.

شبیه‌سازی مدارهای آسیای میله‌ای بسیاری با فرض ثابت بودن تابع شکست و استفاده از مدل ارائه‌شده در روابط ۵ و ۶ انجام شده و مشاهده شده است که این شبیه‌سازی‌ها دقیق می‌باشند [۴].

۴-۴- ماتریس طبقه‌بندی

ماتریس طبقه‌بندی (C)، یک ماتریس قطری است که فرآیند طبقه‌بندی داخلی هر مرحله خردایش را تعریف می‌کند. یک مرحله خردایش به عنوان بازه مورد نیاز برای ناپدید شدن بزرگترین طبقه اندازه از خوراک واردشده به مرحله، تعریف شد. این ایجاب می‌کند که عنصر C_{11} در مرحله اول برابر با واحد باشد تا همه ذرات این فراکسیون تا خرد شدن به طبقات پایین‌تر، در منطقه خردایش باقی بمانند؛ همین‌طور C_{22} در مرحله دوم، C_{33} در مرحله سوم و ... [۴].

برای سایر عناصر در مرحله اول می‌توان مقادیر غیر صفر در نظر گرفت که این به طور سیستماتیک در مراحل بعدی تغییر می‌کند. با این حال، تنها شرط ضروری $C_{11}=1$ است. در عمل یافته شده است که در یک ماتریس طبقه‌بندی مناسب در مرحله اول، $C_{11}=1$ و سایر عناصر برابر با صفر است [۴].

۵-۴- ماتریس تابع انتخاب

ماتریس قطری تابع انتخاب (S)، تعیین‌کننده کسری از هر طبقه سرنديست که برای خرد شدن انتخاب می‌شود. اگر مقادیر B و C ثابت باشند، تغییرات در کانسنگ و خصوصیات دستگاه توسط ماتریس انتخاب، شرح داده می‌شود. مقادیر این ماتریس در یک فرآیند برازش منحنی به دست می‌آید. به طور کلی، دیده شده است که مقادیر روی قطر اصلی ماتریس S با کاهش اندازه ذره کاهش می‌یابد که این انتظار هم می‌رود [۴].

۶-۴- ویژگی‌های مدل

خصوصیات این مدل‌سازی ریاضی برای آسیای میله‌ای بدین شرح است:

الف- با افزایش زمان اقامت ذرات درون آسیا، ناپدید شدن ذرات درشت بیشتر ادامه می‌یابد و تعداد مراحل شکست بیشتر می‌شود.

ب- ماتریس انتخاب (S) و تعداد مراحل شکست (V) دو متغیر موجود در مدل ماتریسی آسیای میله‌ای می‌باشند.

پ- ماتریس انتخاب، تابع خصوصیات آسیا و کانسنگ است. یعنی تغییر در ساختار آسیا (مثلاً قطر میله‌ها) و نوع کانسنگ، موجب تغییر در مقادیر ماتریس انتخاب می‌شود. تعداد مراحل شکست به نرخ خوراک‌دهی، اندازه خوراک، سرعت آسیا و سایر متغیرهای فرآیند بستگی دارد.

۵- الگوریتم شبیه‌سازی

BMCS برای شبیه‌سازی آسیاهای میله‌ای، فرآیند نشان‌داده‌شده در شکل ۶ را طی می‌کند. برنامه پس از دریافت ورودی‌ها، محصول مرحله اول خردایش را محاسبه می‌کند و آن را به عنوان خوراک به مرحله بعد تحویل می‌دهد. در مرحله بعد نیز همین کار انجام می‌شود و این روند تکرارشونده به تعداد مراحل خردایش انجام می‌شود. محصول مرحله آخر، نتیجه شبیه‌سازی است.



شکل ۶- الگوریتم شبیه‌سازی آسیای میله‌ای برنامه‌نویسی شده در محیط BMCS

همچنین این شبیه‌سازی در صفحه گسترده Excel نیز انجام شد که نتایج آن نیز در جدول ۱ آمده است. این پاسخ‌ها در شکل ۷ نیز با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۱: مقایسه نتایج Excel و BMCS با نتیجه لینچ در رابطه با محاسبه توزیع اندازه ذره محصول آسیا

BMCS	Excel	لینچ	محدوده اندازه (μm)
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	+۱۹۰۲۰
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	+۹۵۱۰
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	-۱۹۰۲۰
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	-۹۵۱۰
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	-۴۷۶۰
۹/۴۲	۹/۳۶	۱۱/۳۰	+۲۳۸۰
۲۰/۴۸	۲۰/۴۴	۲۱/۷۰	-۲۳۸۰
۱۸/۹۶	۱۸/۹۹	۱۸/۱۰	-۱۱۹۰
۱۲/۷۲	۱۲/۷۴	۱۲/۰۰	-۵۹۵
۸/۰۲	۸/۰۴	۷/۶۰	-۲۹۸
۳۰/۴۰	۳۰/۴۳	۲۹/۳۰	-۱۴۹
			-۷۵

۷- ارائه یافته‌ها و بحث

از جدول ۱ و شکل ۷ نتیجه می‌شود که مازول آسیای میله‌ای نرم‌افزار BMCS به درستی محاسبات لازم برای پیش‌بینی توزیع اندازه ذره محصول خروجی را انجام می‌دهد. چنان‌که در شکل ۷ دیده می‌شود، نتایج حاصل از BMCS و Excel، انطباق بیشتری با هم دارند و نتایج لینچ به مقدار بسیار کمی با این دو فاصله دارد. شاید بتوان این اختلاف را به عدم وجود ابزارهای محاسباتی پیشرفته در زمانی که لینچ این مسأله را حل کرده است، نسبت داد.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، توسعه برنامه شبیه‌سازی آسیاهای میله‌ای در محیط BMCS بر اساس مدل ماتریسی فرآیند خردایش در این نوع آسیاها انجام گرفت. مقایسه دانه‌بندی پیش‌بینی‌شده محصول آسیای میله‌ای با این برنامه با دانه‌بندی اندازه‌گیری شده برای یک مجموعه داده واقعی گزارش‌شده توسط لینچ، نشان داد که محاسبات برنامه و اجرای آن به درستی صورت گرفته و نتایج برنامه معتبر است. توسعه این برنامه کمک مؤثری در پروژه‌های بهینه‌سازی عملکرد کارخانه‌های دارای مدار آسیای میله‌ای است و راه‌گشای تحقیقات بعدی در رابطه با این نوع آسیاها می‌باشد. کالیبراسیون مدل کلی آسیاهای میله‌ای برای یک آسیای خاص در یک کارخانه فرآوری علاوه بر

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، در هر مرحله، سه ماتریس B، C و S به‌طور سیستماتیک تغییر می‌کنند. پیش‌تر گفته شد که در هر مرحله، بزرگترین فراکسیون اندازه کاملاً ناپدید می‌شود. از آنجا که صفر بودن مقدار تابع شکست به مفهوم عدم وجود ماده است، باید مقدار تابع شکست مربوط به طبقه ناپدیدشده در ماتریس شکست، برای استفاده در مرحله بعد، صفر شود. برای آماده کردن ماتریس‌های C و S برای مرحله بعد باید تمام مقادیر یک طبقه به پایین انتقال یابند. به عبارت دیگر، یک سطر و ستون از انتهای هر ماتریس حذف و یک سطر و ستون به ابتدای آنها اضافه می‌شود. از نقطه نظر مفهومی، مقدار روی قطر اصلی سطر و ستون اضافه‌شده بی‌اهمیت است؛ چرا که با صفر شدن مقدار تابع شکست متناظر، اصولاً ماده‌ای برای انتخاب شدن یا طبقه‌بندی وجود ندارد. اما از نظر ریاضی، صفر قرار دادن این مقدار در ماتریس S باعث معکوس ناپذیر شدن $[I - C \cdot (I - S + B \cdot S)]$ ، که جزئی از رابطه ۵ است می‌شود و خطا ایجاد می‌کند.

در صورتی که متغیر v که در BMCS از رابطه ۷ محاسبه می‌شود، عددی طبیعی نباشد، برنامه برای محاسبه محصول خردایش پس از v مرحله خردایش، از روش درون‌یابی خطی استفاده می‌کند.

۶- اعتبارسنجی شبیه‌ساز

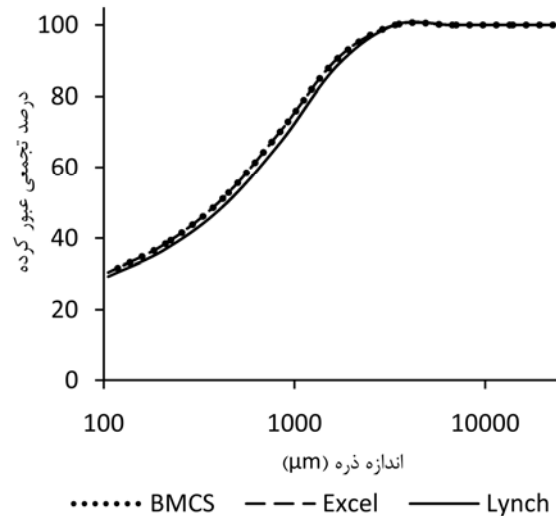
در این بخش برای اعتبارسنجی شبیه‌ساز از داده‌های ارائه‌شده توسط لینچ در منبع شماره [۴] استفاده شده است. این داده‌ها شامل توزیع‌های اندازه ذره خوراک و محصول یک آسیای میله‌ای در دبی خوراک ۱۰۶ تن بر ساعت و همین‌طور مقادیر اولیه ماتریس‌های شکست، انتخاب و طبقه‌بندی می‌باشند.

برای یافتن تعداد مراحل خردایش در این وضعیت، محصول هر مرحله خردایش محاسبه و نتیجه‌گیری شده است که محصول مرحله سوم، همخوانی خوبی با محصول مشاهده‌شده آسیا دارد. بنابراین تعداد مراحل شکست (۷) برابر با ۳ در نظر گرفته شده و با استفاده از رابطه ۷، ثابت آسیا (MC) برابر با ۵۵۰ به دست آمده است. این مقدار به عنوان ثابت آسیا به BMCS وارد شد و شبیه‌ساز، محصول آسیا را با همان خوراک ولی در دبی ۶۱ تن بر ساعت محاسبه کرد. محصول آسیا در این حالت توسط لینچ محاسبه شده است و نتایج لینچ همراه با نتایج BMCS در جدول ۱ آورده شده است.

منابع

- [1] Barry A. Wills, Tim Napier-Munn; 2006; *Mineral Processing Technology*, Elsevier Science & Technology Books.
- [2] A. Gupta, D. S. Yan; 2006; *Introduction to Mineral Processing Design and Operation*, Perth, Australia.
- [3] Farzanegan, A; 1998; "Knowledge-based optimization of mineral grinding circuits", Ph.D. Thesis, University of McGill, Montreal, Canada. pp. 94, 102-105.
- [4] A. J. Lynch; 1977; *Mineral Crushing and Grinding Circuits: Their Simulation, Optimisation and Control*, Elsevier Science Publishers.
- [5] R. P. King; 2001; *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*, Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, USA.
- [6] T. J. Napier-Munn, S. Morrell, R. D. Morrison and T. Kojovic; 1996; *Mineral Comminution Circuits; Their Operation and Optimisation*, JKMRM Monograph Series in Mining and Mineral Processing, No. 2, Jullius Kruttschnitt Mineral Research Center, Australia.

تعیین پارامترهای تابع شکست و تابع انتخاب، همچنین نیازمند تعیین ثابت آسیاست که الگوریتم آن با استفاده از روش حداقل مربعات، به عنوان بخشی از نرم‌افزار دیگری با نام ^۴NGOTC در ادامه این پروژه پیاده‌سازی خواهد شد.



شکل ۷: مقایسه نتایج پیش‌بینی توزیع اندازه ذره محصول آسیای میله‌ای توسط لینچ، Excel و BMCS

پی‌نوشت

- ¹ Steady state
- ² Screening effect
- ³ Internal classification
- ⁴ Numerical Grinding Optimization Tools in C