





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

بهینه سازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه با استفاده از الگوریتم

بهینه سازی ازدحام ذرات

اکبر محتشم

استاد راهنما

دکتر محمد کارآموزیان

استاد مشاور

دکتر حسین میرزایی نصیرآباد

بهمن ۹۲

ب

فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای اکبر محتشم، رشته مهندسی معدن گرایش استخراج معدن تحت عنوان بهینه سازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات که در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه): خوب امتیاز: ۱۴ دفاع مجدد مردود

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر محمد کارآموزیان	۱- استاد راهنمای اول
			۲- استاد راهنمای دوم
	استادیار	دکتر حسین میرزایی نصیرآباد	۳- استاد مشاور
	استاد	دکتر سعید کریمی	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر فرهنگ سرشکی	۵- استاد ممتحن اول
	استاد	دکتر رضا کلاکایی	۶- استاد ممتحن دوم

رئیس دانشکده:



تعهد نامه

اینجانب اکبر محتشم دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه سازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات تحت راهنمایی دکتر محمد کارآموزیان متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

آورد به اضطرابم اول به وجود

بزحیرتم از حیات چیزی نفوذ

رفیم به الراه و ندانیم چه بود

زین آمدن و بودن و رفتن مصود

با سپاس فراوان از زحمات بی دریغ استاد عزیزم جناب آقای دکتر محمد کارآموزیان که مرا در پیشبرد این مطالعه یاری کردند، سرافرازی ایشان را در تمامی مراحل زندگی آرزومندم. همچنین از رهنمودهای آقای دکتر حسین میرزایی نصیر آباد که در این پایان نامه استاد مشاور اینجانب بوده‌اند، تشکر می‌نمایم.

در پایان از راهنمایی و تلاش‌های دوست عزیزم مهندس فرید کریمی که در تسهیل و پیشبرد این پایان نامه مرا حمایت کردند تشکر و قدردانی می‌کنم.

چکیده

قسمت اعظم هزینه و مصرف انرژی (حدود ۶۰ درصد) در بخش فرآوری مواد معدنی، مربوط به دستگاه‌های خردایش است. از اینرو باید تدابیری در نظر گرفت تا علاوه بر دست یابی به ابعاد مورد نظر، از خردایش بیش از حد مواد و مصرف بی رویه انرژی جلوگیری کرد، چون نقش بسیار مهمی در توجیه اقتصادی محصول و قیمت تمام شده آن دارد.

در اکثر موارد به دلیل پیچیدگی ذاتی عملیات، تعدد عوامل درگیر و نیز مطلوب نبودن طراحی اولیه، کارایی مدار خردایش کمتر از مقدار پیش بینی شده است. از اینرو از مدل‌های ریاضی و روش‌های بهینه سازی متعددی برای تعیین شرایط بهینه عملیاتی دستگاه‌های خرد کننده و فرآیندها استفاده شده است. در اکثر مسایل مهندسی استفاده از الگوریتم‌های تکاملی به دلیل مسایل اقتصادی و مدیریت زمان به کار گرفته می‌شود. معادلات موجود برای تعیین توان مصرفی به دلیل متغیرهای زیادی که اغلب در دسترس نیستند، نمی‌توانند در پیش بینی توان مصرفی آسیا به طور موثر به کار گرفته شوند. بنابراین در این پایان نامه ابتدا معادلات معتبر و شاخص برای محاسبه توان مصرفی مورد بررسی قرار گرفتند که مشخص شد دو مدل توان نرمال شده آسیا و مدل تجربی آستین برای تخمین توان آسیاهای صنعتی، تطبیق بیشتری با داده‌های واقعی دارند. سپس از این معادلات برای تعریف تابع هدف براساس روش بهینه سازی ازدحام ذرات استفاده شد و تابع هزینه براساس کمینه کردن توان مصرفی دستگاه مدل سازی شد و مقدار واقعی توان دستگاه به عنوان بهینه کلی در نظر گرفته شد. نتایج بر روی دو مدل مورد نظر نشان دادند که این روش از عملکرد بسیار خوبی برای بهینه سازی توان مصرفی آسیا برخوردار است و معادله توان نرمال شده آسیا با مقدار خطای نسبی ۰/۰۰۶۱ بهترین عملکرد را دارد.

کلمات کلیدی: بهینه سازی، توان مصرفی آسیا، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)، آسیای نیمه خودشکن (SAG Mill)، مجتمع مس سرچشمه.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- کلیات.....	۲
۱-۲- هدف از انجام پایان نامه.....	۳
۱-۳- ضرورت و سابقه انجام تحقیق.....	۴
۱-۴- روش انجام تحقیق.....	۷
۱-۵- ساختار پایان نامه.....	۸
فصل دوم: عوامل موثر بر عملکرد آسیای نیمه خودشکن و مفاهیم الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات.....	
۱-۲- مقدمه.....	۱۱
۲-۲- تاریخچه خردایش خودشکنی.....	۱۲
۳-۲- معرفی آسیای نیمه خودشکن.....	۱۳
۲-۳-۱- معرفی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه.....	۱۵
۲-۴-۱- عوامل موثر بر فرآیند خردایش در آسیاهای نیمه خودشکن.....	۱۷
۲-۴-۲- خوراک ورودی آسیا.....	۱۹
۲-۴-۲- شارژ گلوله آسیا.....	۱۹
۲-۴-۲- نقش سرعت آسیا.....	۲۲
۲-۵- بهینه‌سازی و مشکلات مربوط به آن.....	۲۳
۲-۵-۱- شاخص‌های بهینه‌سازی.....	۲۴
۲-۶- محاسبات و معادلات توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن.....	۲۷
۲-۶-۱- توان نرمال شده (نسبی) آسیا.....	۲۸
۲-۶-۲- توان نرمال شده (نسبی) آسیا.....	۳۳

۳۴	..... ۲-۶-۲- توان خالص و توان بدون بار
۳۶	..... ۲-۷- جمع بندی
۳۹	..... فصل سوم: الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات
۴۰	..... ۳-۱- مقدمه
۴۱	..... ۳-۲- الگوریتم‌های تکاملی
۴۳	..... ۳-۳- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات
۴۹	..... ۳-۴- شبه کد الگوریتم ازدحام ذرات
۵۳	..... ۳-۵- جمع بندی
۵۵	..... فصل چهارم: مروری بر تحقیقات انجام شده
۵۶	..... ۴-۱- مقدمه
۵۷	..... ۴-۲- پروژه‌های اجرا شده
۵۸	..... ۴-۲-۱- مدل سازی ریاضی توان کشی در آسیاهای گردان
۶۰	..... ۴-۲-۲- شبیه سازی توان مصرفی توان آسیای نیمه‌خودشکن کارخانه تغلیظ سرچشمه
۶۲	..... ۴-۲-۳- بهینه سازی زمان واقعی آسیای نیمه‌خودشکن با استفاده از الگوریتم ژنتیک
۶۴	..... ۴-۲-۴- تعیین روابط بین پارامترهای ورودی در مدل سازی توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن
۶۶	..... ۴-۲-۵- شبیه‌سازی زمان تاخیر ابعاد ذرات ورودی آسیای نیمه‌خودشکن با استفاده از شبکه عصبی
۶۸	..... ۴-۲-۶- دیگر کارهای انجام شده در زمینه آسیای نیمه‌خودشکن
۷۱	..... ۴-۳- جمع بندی
۷۳	..... فصل پنجم: ارزیابی مدل‌های مختلف توان آسیای نیمه خودشکن و انتخاب مدل‌های مناسب
۷۴	..... ۵-۱- مقدمه
۷۵	..... ۵-۲- عکس العمل آسیای نیمه خودشکن بر روی خوراک

۷۷	۳-۵- بررسی معادلات ارائه شده برای محاسبه توان آسیای نیمه خودشکن
۸۳	۴-۵- تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی الگوریتم ازدحام ذرات
۹۲	۵-۵- جمع بندی
۹۳	فصل ششم: بهینه سازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات
۹۴	۱-۶- مقدمه
۹۴	۲-۶- مدل سازی توان آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه
۹۴	۱-۲-۶- روند مدل سازی مسئله مورد نظر
۹۵	۱-۲-۶-۱- مدل ارزیابی شده برای تابع هدف
۹۸	۲-۶-۱-۲- انتخاب تابع هزینه مسئله مورد نظر
۱۰۰	۲-۶-۱-۳- تنظیم پارامترهای الگوریتم
۱۰۱	۲-۶-۱-۴- محاسبات و گرفتن خروجی‌ها
۱۰۳	۳-۶- ارزیابی مدل PM1 با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات
۱۰۴	۴-۶- ارزیابی مدل PM7 با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات
۱۰۷	۵-۶- اعتبار سنجی نتایج
۱۱۲	۵-۶- جمع بندی
۱۱۳	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۱۴	۱-۷- نتیجه‌گیری
۱۱۶	۲-۷- پیشنهادات
۱۱۷	منابع و مأخذ

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱-۱- روند نما نحوه سازماندهی پایان نامه..... ۹
- شکل ۱-۲-۱- مکانیزم های اصلی شکست ۱۳
- شکل ۲-۲- آسیای نیمه خودشکن..... ۱۷
- شکل ۳-۲- موقعیت شبکه‌ها در داخل آسیای نیمه خودشکن..... ۱۸
- شکل ۴-۲- نمای کلی شبکه های نصب شده در داخل آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه..... ۱۹
- شکل ۵-۲- حرکت ذرات در آسیا مطابق با مدل‌های فورستانو، هوک و آستین..... ۳۱
- شکل ۶-۲- رابطه بین بار و توان آسیا در دو بارگذاری متفاوت شارژ گلوله..... ۳۴
- شکل ۳-۱- اساس کار الگوریتم PSO..... ۴۷
- شکل ۳-۲- فلوجارت استاندارد الگوریتم PSO ۴۸
- شکل ۴-۱- نمودار جریان برنامه محاسبه توان کشی..... ۵۹
- شکل ۴-۲- نمودار توزیع احتمال توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن..... ۶۱
- شکل ۴-۳- نمودار آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی..... ۶۱
- شکل ۴-۴- مدل پیش بینی و واقعی آسیای نیمه خودشکن..... ۶۳
- شکل ۴-۵- مدل پیش بینی و واقعی آسیای نیمه خودشکن..... ۶۵
- شکل ۴-۶- شمای یک آسیای نیمه خودشکن..... ۶۷
- شکل ۴-۷- نتایج حاصله از پیش بینی مدل ایجاد شده با مقادیر واقعی بر چهار مدل فرضی..... ۶۷
- شکل ۴-۸- بهبود نتایج پیش بینی مدل شبیه سازی شده با استفاده از شبکه عصبی با توجه به مقادیر واقعی..... ۶۸
- شکل ۵-۱- روند انجام محاسبات تعیین عوامل عملیاتی آسیاها..... ۷۵
- شکل ۵-۲- نتایج حاصله از پیش بینی مدل ایجاد شده با مقادیر واقعی..... ۷۹

- شکل ۵-۳- نتایج حاصله از پیش بینی مدل ایجاد شده با مقادیر واقعی..... ۸۰
- شکل ۵-۴- نتایج حاصله از پیش بینی مدل ایجاد شده با مقادیر واقعی..... ۸۱
- شکل ۵-۵- نتایج حاصله از پیش بینی مدل ایجاد شده با مقادیر واقعی..... ۸۲
- شکل ۵-۶- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر درصد پرشدگی آسیا..... ۸۴
- شکل ۵-۷- نمودار تخمین خطا برای پارامتر درصد پرشدگی آسیا..... ۸۵
- شکل ۵-۸- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر شارژ گلوله آسیا..... ۸۶
- شکل ۵-۹- نمودار تخمین خطا برای پارامتر شارژ گلوله آسیا..... ۸۶
- شکل ۵-۱۰- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر جرم گلوله آسیا..... ۸۷
- شکل ۵-۱۱- نمودار تخمین خطا برای پارامتر جرم گلوله آسیا..... ۸۷
- شکل ۵-۱۲- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر چگالی شارژ توده آسیا..... ۸۸
- شکل ۵-۱۳- نمودار تخمین خطا برای پارامتر چگالی شارژ توده آسیا..... ۸۸
- شکل ۵-۱۴- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر درصد جامد آسیا..... ۸۹
- شکل ۵-۱۵- نمودار تخمین خطا برای پارامتر درصد جامد آسیا..... ۸۹
- شکل ۵-۱۶- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر درصد پالپ آسیا..... ۹۰
- شکل ۵-۱۷- نمودار تخمین خطا برای پارامتر درصد پالپ آسیا..... ۹۰
- شکل ۵-۱۸- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر بار در گردش آسیا..... ۹۱
- شکل ۵-۱۹- نمودار تخمین خطا برای پارامتر بار در گردش آسیا..... ۹۱
- شکل ۶-۱- فلوجارت مدل توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات..... ۱۰۲
- شکل ۶-۲- نمودار معادله PM_{10} با روند بهبود جواب بعد تکرارهای متوالی..... ۱۰۳
- شکل ۶-۳- نمودار نیمه لگاریتمی معادله PM_{10} با روند بهبود جواب بعد تکرارهای متوالی..... ۱۰۴
- شکل ۶-۴- نمودار معادله PM_{10} با روند بهبود جواب بعد تکرارهای متوالی..... ۱۰۵

شکل ۶-۵- نمودار نیمه لگاریتمی معادله PM_۷ با روند بهبود جواب بعد تکرارهای متوالی..... ۱۰۵

شکل ۶-۶- مقایسه توان مصرفی پیش بینی توسط PSO برای معادله PM_۱ با مقادیر واقعی..... ۱۱۰

شکل ۶-۷- مقایسه توان مصرفی پیش بینی توسط PSO برای معادله PM_۷ با مقادیر واقعی..... ۱۱۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- توسعه خردایش خودشکنی میانی و ثانویه..... ۱۵
- جدول ۲-۲- مشخصات خوراک آسیاهای نیمه‌خودشکن و روش تعیین آن..... ۲۲
- جدول ۳-۲- عوامل موثر در بهینه سازی پارامترهای عملیاتی آسیای نیمه خودشکن..... ۲۵
- جدول ۱-۴- مقایسه توان‌های مختلف محاسبه شده با مدل‌های مختلف ارائه شده..... ۵۹
- جدول ۲-۴- کارهای انجام شده در مورد آسیاهای نیمه‌خودشکن..... ۶۹
- جدول ۱-۵- مقایسه مقادیر واقعی با نتایج پیش بینی با معادلات مدل شده برای محاسبه توان دستگاه..... ۷۸
- جدول ۲-۵- بازه تغییرات هر یک از پارامترها نسبت به توان مصرفی توسط PSO..... ۹۲
- جدول ۱-۶- پارامترهای معادلات مدل شده با استفاده از الگوریتم PSO..... ۱۰۶
- جدول ۲-۶- مشخصات الگوریتم PSO مورد مطالعه..... ۱۰۶
- جدول ۳-۶- میزان توان مصرفی محاسبه شده توسط مدل PM1 با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات و میزان توان مصرفی اندازه گیری شده برای یک سیکل کاری دستگاه آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه..... ۱۰۸
- جدول ۴-۶- میزان توان مصرفی محاسبه شده توسط مدل PM7 با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات و میزان توان مصرفی اندازه گیری شده برای یک سیکل کاری دستگاه آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه..... ۱۰۹
- جدول ۵-۶- مقدار معیار MSE هر یک از معادلات شبیه سازی شده..... ۱۱۱

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- کلیات

در طول دهه‌های اخیر با پیشرفت تجهیزات صنعتی در بخش استخراج و فرآوری مواد معدنی، استخراج ذخایر با تناژ بالا و عیار کم رایج شده که بیشتر ذخایر پورفیری را تشکیل می‌دهند. ابعاد ذرات ماده معدنی موجود در کانسنگ استخراج شده به قدری ریز هستند که نیاز به خردایش^۱ زیادی دارند تا در مراحل بعدی فرآوری بتوان با روش‌های مورد نظر جدا کرد. از این رو نیاز به تجهیزات عظیم و سرمایه‌گذاری‌های زیادی است تا ماده معدنی مورد نیاز به قدر کافی خرد شود تا در مرحله جدایش^۲ یک محصول نهایی با عیار مناسب برای فروش و قابل رقابت با صنایع وابسته حاصل کرد (هاسکینزو ویل، ۱۳۶۸). در بخش خردایش بعد از مرحله سنگ شکنی^۳ مواد معدنی وارد بخش آسیا کنی^۴ می‌شود که معمولاً اکثر آسیاها از نوع گردان^۵ هستند. برای این که آسیاها مواد معدنی را از ابعاد ورودی به ابعاد خیلی ریزتری که خوراک بخش جدایش است، آماده کنند نیاز به مصرف انرژی زیادی دارند که گاهی نصف هزینه کارخانه فرآوری، صرف بخش خردایش می‌شود. از این رو با بالا بودن توان مصرفی دستگاه و هزینه‌های جاری سعی بر آن است با طراحی دقیق، به روش‌های تجربی و روش‌های هوشمند تکاملی بتوان این هزینه‌ها را تا حد امکان کاهش داد تا بتوان ماده معدنی با کیفیت بالا و قیمت مناسب برای رقابت در بازار جهانی تولید کرد.

در آخرین مرحله از معدنکاری کانسنگ استخراج شده به عنوان بار ورودی^۶ وارد کارخانه کانه آرایی می‌شود. مرحله اول کانه آرایی، خردایش می‌باشد که شامل دو مرحله است. بطور کلی هزینه انرژی مصرفی در مرحله آسیا کنی به مراتب بیشتر از سنگ‌شکنی است (نعمت‌الهی، ۱۳۷۶). متداول‌ترین

^۱ Comminution

^۲ Separation

^۳ Crushing

^۴ Grinding

^۵ Tumbling Mill

^۶ Run-of-mine Ore

آسیاها در کارخانه‌های فرآوری جدید آسیاهای خودشکن^۱ و نیمه‌خودشکن^۲ هستند. در سال ۱۹۷۰ اولین روش‌های مدل‌سازی بر روی توان مصرفی آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن با استفاده از تئوری‌های تجربی مانند کیک^۳، ریتینگر^۴، باند^۵ و... ارایه شد. بدلیل ایجاد مشکلات کاری در آسیای خودشکن از قبیل ایجاد ابعاد بحرانی زیادتر، خردایش بیش از حد و تولید نرمه که در مراحل جدایش مضر است، صدمه به آسترهای داخلی آسیا و تعویض آن که شرایط هزینه و زمان را در انجام پروژه به تعویق می‌انداخت (آستین، ۱۹۹۰)، با اضافه کردن ۵ تا ۱۲ درصد گلوله از حالت خودشکن به نیمه‌خودشکن تبدیل شد. پارامترهای اساسی که بر فرآیند خردایش در آسیای نیمه‌خودشکن تاثیر دارند عبارتند از: ۱- درصد بار حجمی داخل آسیا ۲- حجم و ابعاد گلوله در داخل آسیا ۳- ابعاد خوراک ورودی ۴- سختی و وزن مخصوص ماده معدنی ۵- سرعت آسیا ۶- چگالی شارژ توده^۶ آسیا ۷- بار در گردش ۸- درصد پالپ و... که پارامترهای بیان شده در راندمان کار خردایش و توان مصرفی آسیا تاثیر مستقیمی دارند که اگر این پارامترها دقیق انتخاب نشوند توان دستگاه و کارایی مرحله خردایش پایین می‌آید.

۱-۲- هدف از انجام پایان نامه

هدف از انجام این پایان نامه استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای کمینه کردن توان مصرفی به ازای خوراک ورودی آسیای نیمه‌خودشکن، پیش‌بینی و کنترل پارامترهای عملیاتی که مستقیم بر روی توان تاثیر دارند، است. در این پایان نامه ابتدا معادلات شاخص و معتبر که همه آنها تجربی و آزمایشگاهی هستند، برای محاسبه توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن بررسی می‌شوند. بعد

^۱ Autogenous Mill (AG mill)

^۲ Semi Autogenous Mill (SAG mill)

^۳ Rittinger

^۴ Kick

^۵ Bond

^۶ Bulk

این که معادلات مورد نظر به دست آمد، به تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی که چه مقدار بر روی توان مصرفی تاثیر دارند پرداخته می‌شوند. در مرحله آخر هم با توجه به پارامترهای موثر به دست آمده تابع هدف با عنوان کمینه کردن توان مصرفی تعریف شده است. برای محاسبه تابع هدف باید یک تابع هزینه تعریف کرد، که تابع هزینه برای محاسبه مقدار توان با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات انجام شد. مقدار بهینه کلی به عنوان توان مصرفی مد نظر از مدل شبیه سازی شده با در نظر گرفتن میانگین مربعات خطا برای تابع هزینه مدل تعریف شد. خروجی مدل مقدار توان مصرفی بهینه است که توسط الگوریتم ازدحام ذرات پیش بینی شد. کد نویسی الگوریتم در محیط متلب^۱ انجام شده است. پس از اعمال کدها و حصول پاسخ مناسب، نتایج مورد اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند.

۱-۳- ضرورت و سابقه انجام تحقیق

بدلیل اینکه بخش اعظم مصرف انرژی را آسیاها صرف می‌کنند سعی بر آن است با استفاده از روش‌های هوشمند بهینه سازی^۲، میزان انرژی مصرفی را کاهش یا به عبارتی بازدهی توان مصرفی آسیا را افزایش داد. چون با گذشت زمان، هزینه های فرآوری در حال افزایش است. بنابراین تعیین شرایط عملیاتی بهینه آسیاها ضرورت پیدا می‌کنند. روشهای مختلفی برای بهینه سازی وجود دارند که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند که در میان آنها روشهای بهینه سازی هوشمند کاربرد بیشتری پیدا کرده اند. به دلیل این که اکثر معادلات موجود برای محاسبه توان مصرفی آسیا مدل‌های تجربی و آزمایشگاهی هستند و هم چنین شرایط کاری یک فرآیند تقریباً پیچیده است به همین دلیل نمی‌توان از روش‌های کلاسیک ریاضی برای مدل سازی و پیش بینی شرایط کاری استفاده کرد. به همین منظور از روش‌های هوشمند بهینه سازی برای مدل سازی و کنترل پارامترهای عملیاتی استفاده می‌شود. روش‌های هوشمند دستورالعمل‌هایی هستند که به صورت کلی می‌توانند در حل مسئله بکار گرفته شوند. از طرف دیگر روش‌های تجربی و آزمایشگاهی نیاز به زمان و هزینه بالا دارند

^۱ MATLAB

^۲ Intelligence Optimization

که روش های هوشمند برای بهینه سازی مسایل نیاز به زمان کمتر و هزینه های کمتری نیاز دارند. در این پایان نامه از روش بهینه سازی ازدحام ذرات^۱ برای حل مسئله استفاده شده است. در روش ازدحام ذرات، ترکیب اطلاعات به صورت اجتماعی است ولی در روشهای دیگر مانند الگوریتم ژنتیک^۲، هیچ جریان اطلاعاتی^۳ بین پارامترها وجود ندارد. ایراد دیگر در نوشتن تابع سازگاری و همچنین ارزیابی پاسخهای بهینه محلی به جای جواب بهینه کلی در روش الگوریتم ژنتیک است. در الگوریتم ژنتیک هیچ گونه اطلاعات اولیه بین پارامترها در دست نیست یا بسیار محدود است. بطور کلی زمانی از الگوریتم ژنتیک استفاده می شود که به دلیل کمبود اطلاعات اولیه از مسئله، نتوان با روشهای دیگر به جواب رسید. اما در الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات ارتباط بین پارامترها در تمام مراحل بهینه سازی حفظ می شود. برای نمونه اگر پارامتری در مراحل اولیه تاثیر بالایی از خود نشان دهد، تاثیر این پارامتر تا مراحل نهایی حفظ می شود. به همین دلیل پاسخ بهینه این روش کلی است و محلی نیست (متلب سایت، ۱۳۸۹). این روش، نسبتاً جدید است که در زمینه معدن کمتر استفاده شده است. به خصوص که گزارشی در مورد کاربرد آن در زمینه فرآوری یافت نشد.

تلاش برای مدل سازی خردایش در آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن از اواخر دهه ۱۹۷۰ توسط استنلی^۴، گالت^۵ و داکورث^۶ صورت گرفت (کاواترا، ۲۰۰۶). مدل ابتدایی ارایه شده توسط لینگ^۷، برای ارتباط دادن انرژی مصرفی به شکسته شدن سنگ در آسیای نوع خودشکن توسط مرکز تحقیقاتی JKMR^۸ استرالیا ارایه شد. یکی از عوامل مهم تصمیم گیری در انتخاب آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن، برآورد صحیح توان آنها می باشد. به دلیل مصرف بالای انرژی در این دستگاهها و هزینه

^۱ Particle Swarm Optimization Algorithm

^۲ Genetic Algorithm

^۳ Information Flow

^۴ Stanley

^۵ Gault

^۶ Duckworth

^۷ Leung

^۸ Julius Kruttschnitt Mineral Research Center

روز افزون انرژی، بکارگیری این دستگاه‌ها با مصرف بهینه انرژی، صرفه اقتصادی زیادی را ایجاد می‌کند. مفهوم خردایش نیمه خودشکن، باعث کاهش مشکلات سنگ شکنی ریز دانه و امکان فرآوری کم هزینه‌تر کانسارهای غیر اقتصادی می‌شود. آستین^۱ یک سری معادلات براساس ساختار قانون باند برای محاسبه توان آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن ارائه کرد (آستین، ۱۹۹۰)، بعد روابط محاسبات توان خالص^۲ و توان بدون بار توسط مورل^۳ معرفی شدند که سپس اصلاحاتی در آن انجام شد (مورل، ۲۰۰۴). مدل‌های ریاضی گوناگونی هم در شبیه سازی مدار آسیا مورد استفاده گرفت که می‌توان به مدل ریاضی سینیتیکی، ماتریسی و ترکیبی کامل اشاره کرد (لاینج^۴، ۲۰۰۵). از اولین روش‌های مدل سازی عمومی برای آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن می‌توان به روش مدل‌های جعبه سیاه اشاره کرد که تابعی از ابعاد خوراک، سختی ماده معدنی و شرایط عملیاتی آسیا است (لاینج^۵، ۲۰۰۵). روش مدل موازنه جمعیتی که در سال ۱۹۹۷ توسط ایپستین^۶ معرفی و در سال ۱۹۹۸ توسط آستین تکمیل شد. در سال ۲۰۰۶ کاواترا^۷ مدل آزمایشگاهی برای بهبود توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن ارائه کرد و آن را از حد نیمه صنعتی به طرح‌های صنعتی گسترش داد. مورل هم یک مدل جدید در مقیاس آزمایشگاهی برای بهینه سازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن و طراحی مدار آسیا در سال ۲۰۰۶ بیان کرد (مورل، ۲۰۰۶). در سال ۲۰۰۸ کارآموزیان یک مدل دینامیکی بهینه برای عملکرد آسیای نیمه خودشکن با توسعه مدل آستین ارائه کرد (کارآموزیان، ۱۳۸۷). در بخشی از این تحقیق شرایط بهینه مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک بدست آمد. در سال ۲۰۰۸ کارآموزیان همچنین با استفاده از شبکه عصبی^۸ مدلی را برای پیش بینی توان

^۱ Austin

^۲ Power net

^۳ Morell

^۴ Lynch

^۵ Lynch

^۶ Epstein

^۷ Kawtra

^۸ Neural Network

مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن معرفی کرد (کارآموزیان، ۱۳۸۷). در سال ۲۰۰۹ سالازار^۱، مگنی^۲ و کوبیلوس^۳ یک مدل دینامیکی برای بهینه‌سازی توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن بیان کردند (سالازار و همکاران، ۲۰۰۹). در سال ۲۰۱۰ بیگر^۴ و همکاران بهینه‌سازی زمان واقعی کارکرد آسیای نیمه‌خودشکن را با استفاده از الگوریتم ژنتیک را انجام دادند که به یک حالت پایدار و مطلوب رسیدند (بیگر و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین در سال ۲۰۱۰ دونکو^۵ و شینگ^۶ مدل‌سازی زمان‌های تاخیر با استفاده از شبکه عصبی برای بار ورودی در آسیای نیمه‌خودشکن را انجام دادند (دونکو و شینگ، ۲۰۱۱). مدرس و همکاران در سال ۲۰۰۹ از الگوریتم بهینه‌سازی جمعی ذرات و شبکه عصبی برای تعیین پیش‌بینی قابلیت خردشوندگی زغال با توجه به ساختار مینرالوژیکی آن استفاده کردند (مدرس و همکاران، ۲۰۰۹). در سال ۲۰۱۱ خامسی از این الگوریتم برای تحلیل برگشتی هوشمند خط ۲ مترو کرج استفاده کرد (خامسی، ۲۰۱۱). اما سابقه‌ای از کاربرد الگوریتم ازدحام ذرات در بهینه‌سازی بخش‌های مختلف فرآوری مواد معدنی یافت نشد.

۴-۱- روش انجام تحقیق

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات توسط کندی^۷ و ابرهارت^۸ در سال ۱۹۹۵ معرفی شد و با الهام از رفتار اجتماعی حیواناتی مانند ماهی‌ها و پرندگان که در گروه‌های کوچک و بزرگ کنار هم زندگی می‌کنند طراحی شده است (کندی و ابرهارت، ۱۹۹۵). در این الگوریتم ذرات با هم همیاری می‌کنند، اطلاعاتی که درباره موقعیتی که در آن هستند با هم تبادل می‌کنند، این همیاری در الگوریتم ازدحام ذرات به شکل زیر است: ۱- هر ذره دارای همسایگی‌های منتسب به خودش است ۲- یک ذره از

^۱ Salazar

^۲ Magne

^۳ Cubillos

^۴ Beiger

^۵ Don Ko

^۶ Shang

^۷ Kennedy

^۸ Eberhart

تطابق همسایگی اش از موقعیت ذره‌های که بهترین وضعیت را دارد استفاده می‌کند ۳- از این موقعیت به سادگی برای تنظیم سرعت ذره استفاده می‌شود. از مزایایی این روش می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: ۱- یک مرتبه صفر است و نیازی به عملیات سنگین ریاضی مثل گرادینان‌گیری ندارد. ۲- روش مبتنی بر جمعیت است. ۳- از مشارکت ذرات استفاده می‌کند. ۴- نتایج شبیه سازی با شبکه عصبی نشان می‌دهد که الگوریتم ازدحام ذرات می‌تواند صحت پاسخ به شبکه را افزایش و زمان آموزش را کاهش دهد ۵- نیاز به یک کنترل سراسری ندارد. یعنی هر ذره خود اختیار نسبی دارد و می‌تواند در سراسر فضای جواب‌ها حرکت کند و با سایر ذرات همکاری داشته باشد. این الگوریتم در توصیف کلی به صورت زیر است: هر ذره دنبال مکانی بوده که بهترین موقعیت را در آن کسب کرده و با بهترین موقعیتی که در کل همسایگی اش وجود دارد خود را تنظیم می‌کند.

۱-۵- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در ۷ فصل به شرح زیر تدوین شده است:

در فصل اول (پیش‌رو)، کلیات، هدف از انجام پایان نامه، ضرورت انجام پایان نامه، روش انجام کار پایان نامه و ساختار گزارش پایان نامه آورده شده است.

در فصل دوم به عوامل موثر بر عملکرد آسیای نیمه‌خودشکن و مدل‌های آرایه شده برای محاسبه توان آسیای نیمه خودشکن پرداخته شده است.

در فصل سوم به معرفی و کاربرد الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات پرداخته شده است.

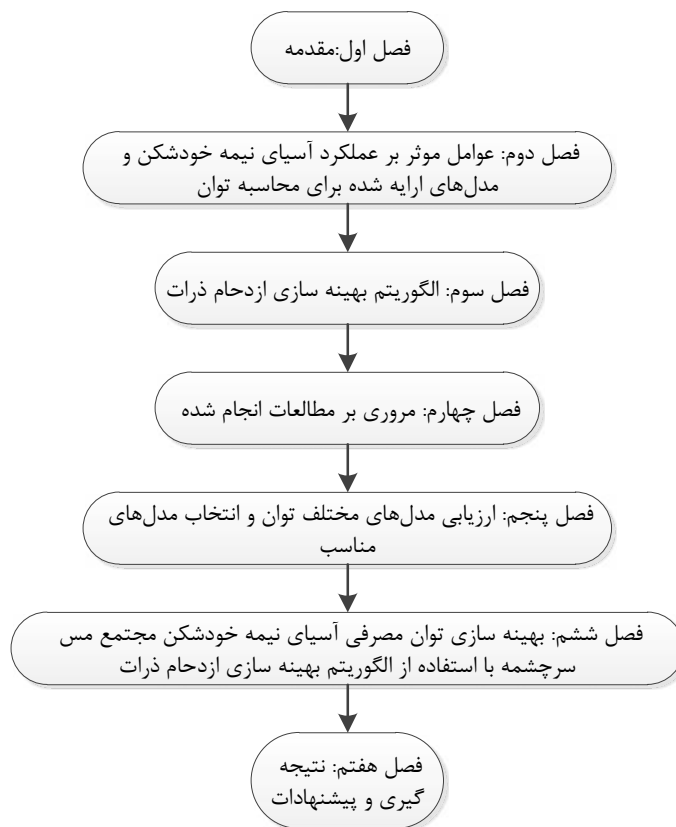
فصل چهارم تحت عنوان مروری بر مطالعات انجام شده می‌باشد که در آن مدل‌ها و روش‌های که به صورت تجربی، مربوط به توان مصرفی آسیاهای نیمه خودشکن بررسی شده‌اند.

در فصل پنجم به ارزیابی مدل‌های مختلف توان و انتخاب مدل‌های مناسب و تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی پرداخته شده است.

در فصل ششم بهینه‌سازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام شده است.

فصل هفتم مربوط به نتیجه‌گیری و پیشنهادهای پایان نامه است.

روند نما نحوه سازماندهی پایان نامه، در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- روند نما نحوه سازماندهی پایان نامه

فصل دوم:

عوامل موثر بر عملکرد آسیای نیمه خودشکن و
مدل‌های ارایه شده برای محاسبه توان آسیا

۲-۱- مقدمه

چهار مکانیزم مشخص برای کاهش ابعاد در آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن مشخص شده است: سایش^۱، لب پدیدگی^۲، ضربه^۳ و خردشدن سنگ معدن^۴. تعریف‌های ارائه شده برای هر یک از این مکانیزم‌ها در منابع مختلف، به دلیل ترکیب برخی از این مکانیزم‌ها با یکدیگر، متفاوت می‌باشد. کینگ^۵ این مکانیزم‌ها را به این صورت تعریف کرده است. سایش شامل خوردگی مداوم سطوح تقریباً صاف تکه‌های سنگ معدن است که به دلیل اصطکاک بین این سطوح در اثر حرکت نسبی آنها به وجود می‌آید. لب پدیدگی وقتی اتفاق می‌افتد که لبه‌های تیز سنگ‌ها بر اثر برخوردهای با انرژی پایین از ذره اصلی جدا می‌شوند. ترک برداشتن وقتی اتفاق می‌افتد که یک ذره کوچک بین دو ذره بزرگ بر اثر برخورد با حرکت غلتشی تحت فشار قرار می‌گیرد و خرد شدن خود سنگ معدن به دلیل برخورد ذره به بدنه آسیا پس از سقوط آزاد اتفاق می‌افتد (جهانی، ۱۳۸۸).

دو مکانیزم اول به عنوان پدیده‌های سطحی شناخته می‌شوند و به همین دلیل اغلب با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در کاربردهای مربوط به مدل‌سازی آسیاکنی مکانیزم خرد شدن عمدتاً به سه نوع تقسیم می‌شود که عبارتند از: سایش، فرسایش و ضربه که در شکل (۲-۱) نشان داده شده‌اند.

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. فرسایش شبیه به سایش بوده با این تفاوت که یک ذره کوچک در بین دو ذره قرار می‌گیرد و در اثر نیروهای وارده از دو ذره بزرگتر، ذره کوچک خرد

^۱ Attrition

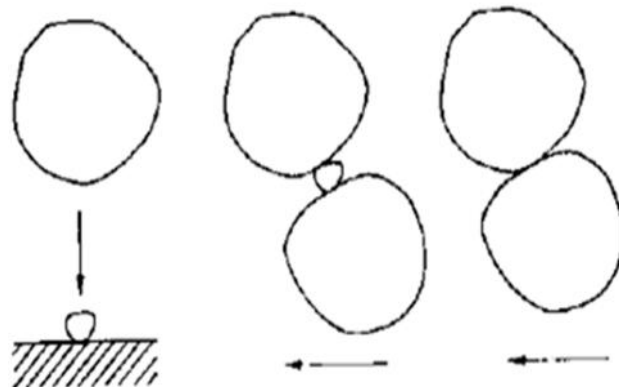
^۲ Chipping

^۳ Impact

^۴ Self-breakage

^۵ King

می‌شود. مکانیزم ضربه تا زمانی که شکست در اندازه دانه‌های بزرگتر از اندازه بلورها اتفاق می‌افتد موثر است و در اندازه‌های ریزتر از اندازه دانه‌های بلور، سایش نقش بیشتری را در خردایش ایفا می‌کند. بنابراین ذرات دانه ریز معمولاً توسط سایش و لب‌پریدگی ایجاد می‌شوند. برای افزایش نرخ خردایش در آسیاهای گردان از گلوله‌ها و میله‌های فولادی استفاده می‌شود.



شکل ۲-۱- مکانیزم های اصلی شکست (از راست به چپ: سایش، فرسایش و ضربه)

بدیهی است که افزایش گلوله به آسیایی که تنها به عنوان خودشکن طراحی و ساخته شده است، ممکن است اشکالات بزرگی ایجاد کند. در سال‌های اخیر، تقریباً همه آسیاهای خودشکن را با تقویت بلبرینگ‌ها، مقاومت بدنه، سیستم انتقال قدرت و سرانجام افزایش توان الکتروموتور، به نحوی طراحی می‌کنند که در صورت نیاز، بدون اعمال تغییراتی قابل تبدیل به آسیای نیمه‌خودشکن باشند. میزان مصرف گلوله باید به دقت تعیین شود و معادل آن گلوله جدید به آسیا افزوده شود. از معایب آسیای نیمه‌خودشکن نسبت به آسیای خودشکن می‌توان هزینه گلوله و افزایش خوردگی داخلی آسیا را ذکر کرد. استفاده از پوشش لاستیکی برای این نوع آسیا مناسب نیست. با وجود این، مجموع گلوله مصرفی و خوردگی جدار داخلی آسیا به ازای هر تن ماده خرد شده به مراتب کمتر از روش‌های سنگ‌شکنی و آسیای گلوله‌ای است (رضایی، ۱۳۷۶).

۲-۲- تاریخچه خردایش خودشکنی

خردایش خودشکنی که در آن خردایش ماده معدنی بدون استفاده از قطعات فلزی یا غیر فلزی صورت می‌گیرد، دارای قدمت زیادی در فرآوری مواد معدنی است. اگرچه زمان استفاده از خردایش خودشکنی به اوایل سال‌های فرآوری مواد معدنی، یعنی زمانی که آسیاهای گردان برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفتند بر می‌گردد، انگیزه فراوانی در استفاده از این نوع خردایش در دهه‌های اخیر ایجاد شده است. مروری بر جنبه‌های تاریخی خردایش خودشکنی، امکان بررسی نحوه توسعه و پیشرفت انواع مختلف آسیاها و فرآیندها را فراهم می‌کند (نوع پرست و همکاران، ۱۳۸۷). قبل از استفاده از آسیاهای میله‌ای و چند سال بعد از توسعه سیستم خوراک دهی پیوسته به آسیاهای گردان، این آسیاها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. واژه آسیای لوله‌ای، به شکل آسیا مربوط نمی‌شد، بلکه این واژه شامل تمام آسیاهای گردان بود که از قلوه‌سنگ‌های خردکننده استفاده می‌کردند.

اولین آزمایش‌های خردایش با آسیای خودشکن در اواخر قرن نوزدهم، هنگامی که آسیاهای گردان برای اولین بار در مدارهای فرآوری مواد معدنی مطرح شد، گزارش شده است. با تجهیزات موجود در آن زمان، خردایش یا آسیای گلوله‌ای بسیار مقرون به صرفه بود. کنت ال گراهام^۱ اولین کسی بود که از آسیای خودشکن استفاده کرد. او در سال ۱۹۰۷ در معدن شرکت گلدن هویس دیپ^۲ در نزدیکی ژوهانسبورگ^۳، آزمایش مقایسه‌ای بر روی دو آسیای لوله‌ای انجام داد. در یکی از آسیاها تکه‌هایی از کانسنگ طلا یا بانکت^۴ و در دیگری قلوه‌سنگ‌های وارداتی دانمارکی، بار خرد کننده را تشکیل می‌دادند. او اولین گزارش خردایش خودشکنی را منتشر کرد. در این آزمایش که ۸۱ روز به طول انجامید، قلوه‌سنگ‌های از جنس ماده معدنی، صرفه‌جویی آشکاری نسبت به قلوه‌سنگ‌های سیلیسی دانمارکی نشان دادند (نوع پرست و همکاران، ۱۳۸۷). در آفریقای جنوبی، فرآیند خودشکن با نام قدیمی آن، یعنی آسیای قلوه سنگی شهرت یافت، در حالی که این نام، خردایش با قطعات خود کانه و

^۱ Kenneth L Graham

^۲ Goldenhuis Deep

^۳ Johannesburg

^۴ Banket

خردایش با قلوه‌سنگ‌های خارجی را از هم متمایز نمی‌کرد؛ بنابراین برای روشن بودن تفاوت این دو در آن زمان، روش اول خردایش قلوه‌سنگی (سنگی) نامیده می‌شد.

اولین مرحله تاریخی در توسعه همان بود که امروزه به عنوان آسیای خودشکن ثانویه یا آسیای قلوه‌سنگی مطرح شده و در آن قطعاتی از ماده معدنی با قطر ۲ تا ۴ اینچ، خوراک را به گونه‌ای خرد می‌کردند که ابعاد تمام آن‌ها از یک هشتم اینچ کوچکتر باشد. مرحله بعدی توسعه که امروزه به خودشکنی میانی معروف است، شامل استفاده از تعداد بیش‌تری قطعات حدوداً ۵ اینچی برای خردایش کانه تا حدی بود که بتوان از آن به عنوان خوراک آسیای میله‌ای و یا حتی کوچکتر از آن استفاده کرد. این روش، در سایر مناطقی که در آن‌ها سرندهایی با چشمه‌های درشت، برای افزایش ظرفیت آسیا به کار می‌رفتند، گسترش یافت.

جدول ۱-۲- توسعه خردایش خودشکنی میانی و ثانویه (نوع پرست و همکاران، ۱۳۸۷)

سال	۱۹۰۷	۱۹۱۳	۱۹۱۴	۱۹۱۸	۱۹۴۹
پیشگام	کنت گراهام	هوک روز	هانچینسون	دوروکس	کروکر
مکان	آفریقای جنوبی	مکزیکو	نوادا	هندوراس	اوتاریو
معدن	گلدن هیوس دیپ	سانتاگرو دیس	گلدفیلدز	رزاریو	لیک-شور
سازنده	A-C	Gates	Gates A-C	Gates A-C	A-C
نوع کانسنگ	طلا	طلا	طلا	نقره	طلا
ظرفیت	-	۱۱۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۱۰۰۰
انتخاب	دستی	سرنده	دستی	دستی	سرنده
بارخردکننده					

در موارد بسیاری، از آسیاهای خودشکن ثانویه و میانی برای افزایش ظرفیت خردایش با مدارهای آسیاهای گلوله‌ای و آسیای میله‌ای-آسیای گلوله‌ای، جایگزین شده‌اند. سومین مرحله توسعه، به کارگیری آسیای خودشکن تر اولیه بود.

۲-۳- معرفی آسیای نیمه خودشکن

در آسیاهای خودشکن ممکن است میزان قطعات درشت سنگ معدنی با ابعاد زیاد کافی نباشد و یا این قطعات سختی لازم را دارا نباشند. در این حالت می‌توان با افزودن مقدار محدودی گلوله فولادی با قطر زیاد، کمبودهای فوق را جبران کرد. به این نوع آسیا نیمه خودشکن گفته می‌شود. قطر گلوله‌ها ۱۰۰ تا ۱۲۵ میلی‌متر است که وزن هر گلوله ۳/۳۹ تا ۷/۶۷ کیلوگرم است. در مقایسه با آسیاهای گلوله‌ای^۱، میزان گلوله اضافه شده بسیار کم است و در حالت خشک حداکثر ۵٪ و در حالت تر حداکثر ۱۰٪ حجم آسیا را اشغال می‌کند. با وجود این، افزودن گلوله، وزن کل بار داخل آسیا را به طور قابل توجه افزایش می‌دهد. درجه انباشتگی^۲ در آسیای نیمه خودشکن حدود ۳۰٪ است. در حالت خشک، با در نظر گرفتن افزایش گلوله به میزان ۵٪ حجم آسیا، یک ششم از کل بار داخلی آسیا را گلوله تشکیل می‌دهد (نعمت‌الهی، ۱۳۸۴).

با توجه به این که چگالی^۳ ظاهری گلوله ۴۶۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب و چگالی ظاهری بیشتر مواد معدنی ۱۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است، بنابراین گلوله‌ها تشکیل ۳۶/۷٪ از وزن مواد داخل آسیا را می‌دهند. به طوری که ملاحظه می‌شود، جایگزین کردن ۵٪ از بار داخلی آسیا با گلوله، باعث افزایش وزن آن به میزان ۳۱/۷٪ می‌شود و بدیهی است که توان مصرفی آسیا^۴ نیز به همین نسبت افزایش می‌یابد. در حالت تر نیز افزایش به میزان ۱۰٪ حجم آسیا، یک سوم از حجم بار داخلی آسیا را گلوله تشکیل می‌دهد که البته در این حالت ۴۰٪ فضای خالی بین گلوله‌ها را نیز آب و مواد جامد (پالپ) پر می‌کنند. بنابراین گلوله‌ها تشکیل ۵۳/۲٪ از وزن مواد داخل آسیا را می‌دهند که باعث افزایش وزن بار آسیا به میزان ۱۰۷/۵٪ می‌شود (نعمت‌الهی، ۱۳۸۴).

^۱ Ball mill

^۲ Loading ratio

^۳ Density

^۴ Mill draw power

از جمله معایب آسیاهای نیمه خودشکن، هزینه گلوله‌های مورد استفاده و افزایش سایش آستر و شکست آن است، لاستیک و آسترهای حاوی لاستیک ممکن است مناسب نباشند. در هر حال میزان سایش کلی گلوله و آستر برای هر تن ماده خردشده به مقدار قابل توجهی کمتر از مقدار سایش در مدارهای سنگ شکنی و خردایش با آسیای گلوله‌ای مرسوم است (نوع پرست و همکاران، ۱۳۸۷).

علت اقتصادی بودن خردایش خودشکنی و نیمه‌خودشکنی عبارتند از: کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای ناشی از حذف سنگ‌شکنی ثانویه در ابعاد ریز دانه‌بندی، سرند کردن، تجهیزات ذخیره مواد، کاهش فضا برای احداث کارخانه، ساده‌تر شدن مدار و هزینه‌های عملیاتی در ابتدا به دلیل مصرف کمتر فولاد کاهش می‌یابد. هزینه‌های سرمایه‌ای برای فرآیند نیمه‌خودشکن از ۷ تا ۲۵٪ کمتر از فرآیند مرسوم است، صرفه جویی اصلی هزینه ناشی از حذف سنگ شکنی مراحل دوم، سوم و تجهیزات مرتبط دانه‌بندی و انتقال مواد مربوط دانه بندی و سایر تجهیزات کارخانه‌ای است. البته هزینه عملیاتی ۲۵٪ کمتر است. در کنار این مزایا معایب این روش عبارتند از: هزینه گلوله، افزایش شکست و سایش آستر و مصرف زیاد انرژی را نام برد (نوع پرست و همکاران، ۱۳۸۷).



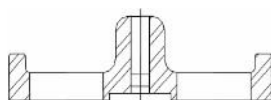
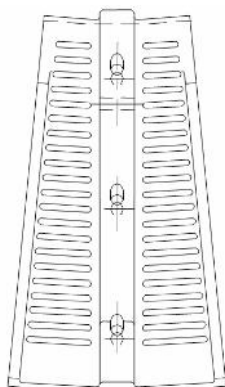
۲-۳-۱- معرفی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه

آسیای نیمه خودشکن نصب شده در مجتمع مس سرچشمه به قطر $9/75$ متر دارای 30 قطعه شبکه برای خروج مواد می‌باشد. این شبکه‌ها از جنس فولاد کروم-مولیبدن مقاوم به ضربه و سایش با متوسط سختی 325 تا 375 برینل^۱ بوده و به جای آخرین ردیف آسترها در سمت خروجی آسیای نیمه خودشکن نصب شده‌اند. طول هر شبکه در حدود 160 سانتی متر و وزن هر قطعه تقریباً یک تن می‌باشد. بر روی هر قطعه شبکه دو ردیف سوراخ 21 تایی با عرض در قسمت جلوی شبکه (سطحی که با پالپ درگیر می‌شود) $2/5$ سانتی متر می‌باشد که به صورت گوه‌ای دو طرفه، این عرض در پشت شبکه برای کاهش دادن گرفتگی سوراخ‌ها به $3/5$ سانتی متر افزایش داده است. طول شکاف‌ها نیز از $16/5$ سانتی متر، به تدریج به $28/5$ سانتی متر (شکاف‌های نزدیکتر به مرکز آسیا دارای طول کمتری هستند) افزایش داده شده است. شکل شکاف‌ها در قسمت جلوی شبکه به صورت مستطیلی با گوشه‌های پخ خورده می‌باشد. همان طور که در شکل زیر نشان داده شده، دو ردیف سوراخ موجود بر روی یک قطعه شبکه، توسط یک بازوی تقویت کننده به ارتفاع تقریبی 15 سانتی متر از هم جدا شده‌اند. قطعه مورد نظر بیشتر به منظور افزایش مقاومت شبکه در مقابل ضربه و جلوگیری از شکست آن اضافه شده است (عظیمی و همکاران، ۱۳۸۷).

^۱ Brinell



شکل ۲-۳- موقعیت شبکه‌ها در داخل آسیای نیمه‌خودشکن



شکل ۲-۴- نمای کلی شبکه‌های نصب شده در داخل آسیای

نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه

۴-۲- عوامل موثر بر فرآیند خردایش در آسیاهای نیمه خودشکن

به طور کلی برای کنترل بهینه توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن عوامل متعددی به صورت مستقیم و غیر مستقیم دخالت دارند که مهمترین آن‌ها عبارتند از: مشخصات کانسنگ یا خوراک^۱ مورد نظر، مشخصات گلوله مصرفی، ظرفیت آسیا، سرعت آسیا و... را نام برد. در این بخش تاثیر این پارامترها بر روی شرایط کاری دستگاه و توان مصرفی بررسی شده است.

۴-۲-۱- خوراک ورودی آسیا

تاثیر اندازه ذرات خوراک بر کارایی آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن به دلیل این که همه و یا بخشی از واسطه خردایش از خود خوراک تامین می‌شود، زیاد است. هر تغییری در توزیع دانه بندی واسطه خردایش نیز تاثیر می‌گذارد که آن نیز خصوصیات خردایشی آسیا را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به طور ایده‌آل توزیع دانه بندی خوراک ورودی به یک آسیای خودشکن باید به اندازه کافی ذرات درشت به همراه داشته باشد تا بتواند انرژی جنبشی^۲ لازم جهت خرد کردن ذرات ریزتر را فراهم نماید. در عین حال باید تعداد ذرات درشت به حدی باشد تا فراوانی نسبتا بالای از شکست ذرات در اثر برخورد^۳ فراهم شود (جهانی، ۱۳۸۸).

در آسیاهای نیمه خودشکن، مخصوصا با افزایش حجم گلوله، سهم واسطه سنگی در خردایش کاهش می‌یابد، در نتیجه خوراک درشت‌تر نقش کمتری در فراهم کردن واسطه خردایش خواهد داشت و در عوض بار درشتی ایجاد خواهد کرد که باید خرد شود. در نتیجه بر عکس موارد ذکر شده برای آسیای خودشکن در این حالت با کاهش اندازه خوراک کارایی عملیات نرم کنی افزایش خواهد یافت (نوع پرست و همکاران، ۱۳۸۷). ماده معدنی نقش واسطه خردایش را دارد، ۲۵ درصد ابعاد دانه درشت را تشکیل داده که ابعادی بین ۶ تا ۸ اینچ را دارند. حالت ایده آل زمانی است که دانه‌های

^۱ Run-of-Mine

^۲ Kinetic energy

^۳ Collision frequency of breakage

درشت کانی سخت در یک زمینه ضعیف در کنار هم قرار گیرند. ابعاد بحرانی، ذراتی که ابعاد آن از ابعاد بار خرد کننده کوچکتر است ولی آن قدر بزرگ هستند که توسط بار خرد کننده مورد خردایش قرار نمی‌گیرند، ابعاد این ذرات بین ۰/۷۵ تا ۲ اینچ است. افزایش سختی کانسنگ باعث کاهش ظرفیت آسیا، افزایش توان مصرفی آسیا، افزایش ابعاد محصول و افزایش بار در گردش را خواهیم داشت. با نرم شدن کانسنگ باعث افزایش ظرفیت آسیا و بار بیش از حد^۱، تولید نرمه و در نهایت دستگاه متوقف می‌شود. رابطه غیر مستقیم بین نرخ خوراک دهی و ابعاد محصول آسیا است که با افزایش خوراک، ابعاد محصول دانه درشت شده و با کاهش خوراک، ابعاد محصول دانه ریز خواهند شد. البته در بعضی مواقع خاص برای کنترل آسیا ممکن است تغییراتی در میزان خوراک دهی و ظرفیت آسیا انجام شود. اندیس کار محاسبه شده با اندیس کار پیش بینی شده به ابعاد دانه‌های کانسنگ مرتبط است. در مورد آسیای نیمه خودشکن معمولاً بین اندیس کاری محاسبه شده با پیش بینی شده همبستگی ضعیفی وجود دارد. اولین مکانیزم شکست از نوع سایش^۲، بوده که خردایش کانسنگ بین دو گلوله یا بین گلوله و آستر انجام می‌شود، دومین مکانیزم شکست ضربه^۳ و سایش است که در این روش در اثر برخورد سقوط مستقیم گلوله می‌شکند. بسیاری از آسیاها با سرعت ۷۵٪ سرعت بحرانی کار می‌کنند، اگر ساینده‌گی کانسنگ افزایش یابد معمولاً سرعت بحرانی را کاهش می‌دهند. اندازه گیری توان آسیای نیمه صنعتی، برای دستیابی به دقت کافی در بزرگ نمایی مقیاس به علت تعدد عوامل درگیر موثر بسیار مشکل است. این مشکل همیشه وجود داشته است که ماده معدنی سخت تر، خوراکی با ابعاد درشت تر را ایجاد می‌نماید، از این رو جدا کردن تاثیر این دو پارامتر مشکل است. از آنجا که آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن دارای عکس العمل‌های متفاوتی نسبت به ایجاد تغییر در سختی سنگ می‌باشند، پیچیدگی مسئله بیشتر می‌شود.

^۱ Over Load

^۲ Attrition

^۳ Abrasion

در مورد آسیاهای نیمه خودشکن، مواد معدنی نرمتر باعث افزایش ظرفیت می‌شود. البته محصول خردایش دارای ابعاد بزرگتری می‌باشد ذرات درشت‌تر زمان کمتری را در داخل آسیا سپری کرده و در نتیجه به آهستگی فقط توسط سایش و لب پدیدگی تحت خردایش قرار می‌گیرند و ذرات خیلی ریز تولید می‌کنند (سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۱).

آسیاهای خودشکن معمولا برای همه انواع مواد معدنی مناسب نیستند و عامل بافت و ماهیت ماده معدنی از مهمترین پارامترهایی است که در این نوع آسیاها مورد توجه قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر هر چه مواد سخت‌تر و سیمان بین کانی‌های تشکیل دهنده ضعیف‌تر باشد، امتیاز استفاده از آنها زیادتر می‌شود. خردایش توسط آسیای نیمه خودشکن وقتی به کار می‌رود که در عملیات خردایش مشکل ایجاد شود و یا سختی و مقاومت سنگ متغیر باشد (رضایی، ۱۳۷۶). در جدول (۲-۲) مشخصات خوراک ورودی آسیای خودشکن و نیمه خودشکن و روش‌های تعیین آن به صورت خلاصه بیان شده است.

جدول ۲-۲- مشخصات خوراک آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن و روش تعیین آن (سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۱)

مشخصه	محدوده مقدار	توضیحات
حداکثر ابعاد ذرات جامد	متغیر، ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر	به ابعاد گلوگاه سنگ‌شکن اولیه یا تجهیزات استخراجی بستگی دارد. ظرفیت و دهانه ورودی آسیا نیز مهم است.
دانه‌بندی (d ₈₀)	بستگی به منبع خوراک آسیا دارد، به عنوان یک معیار می‌توان ۱۰ سانتی‌متر را در نظر گرفت	درجه آزادی باید نزدیک به ابعاد ذرات کانی با ارزش باشد.
نسبت مواد دانه درشت به دانه ریز	مواد دانه درشت تقریبا یک چهارم حجم کل مواد ورودی به آسیا را شامل می‌شود. برای آسیای خودشکن حداقل ۳۰ تا ۴۰ درصد ابعاد ذرات کانسنگ بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر باشند.	نسبت مواد دانه درشت به مواد دانه ریز از ۲۵ (به عنوان محدوده ابعاد بحرانی شناخته می‌شود). برای کنترل این محدوده و حمل و نقل ضروری است.
سختی و مقاومت کانسنگ	نسبت موادسخت به مواد نرم باید در محدوده معینی باشد. در صورت بالا	تعیین اندیس سایش و قابلیت خودشکنی در آزمایش‌های اولیه ضروری است.

	بودن امکان بار مرده(بحرانی) با فرسایش قطعات افزایش می‌یابد.	
وزن مخصوص ماده معدنی	هرچه بیشتر باشد بهتر است.	وزن مخصوص مواد دانه درشت نباید کمتر از وزن مخصوص مواد دانه ریز باشد.
عیار ماده معدنی	متغیر	تا حد امکان عیار کانی با ارزش بیشتر باشد.
شکل و بافت ماده معدنی	بسیار متغیر	تاثیر زیادی بر قابلیت خردایش و در نتیجه ظرفیت آسیا دارد. باید در آزمون‌های اولیه مشخص شود.
درصد جامد پالپ	بین ۶۰ تا ۷۰ درصد وزنی	بر ظرفیت آسیا تاثیر دارد.
چگالی پالپ	به نوع و مشخصات ماده معدنی بستگی دارد.	بر ظرفیت و میزان فرسایش در آسیا تاثیر دارد.

۲-۴-۲- شارژ گلوله آسیا

در جایی که آسیا کردن خودشکن منجر به تولید مواد دانه ریز با ظرفیت پایین می‌شود، آسیا کردن نیمه خودشکن می‌تواند جهت افزایش ظرفیت و تولید مواد درشت‌تر مورد توجه قرار بگیرد. البته گلوله‌ها بر عملکرد آسیا ناشی از وزن مخصوص بالای آن‌ها (۸-۷/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) نسبت به ماده معدنی با همان سختی (وزن مخصوص ۴/۵-۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) تاثیر گذار می‌باشند. این خصوصیت در جایی که امکان تولید مقادیر زیادی انرژی جنبشی وجود داشته باشد، گلوله‌ها را به عنوان یک واسطه خردایش موثر برای خرد کردن ضربه ای مطرح می‌سازد. بر این اساس، گلوله‌ها می‌توانند باعث خرد شدن سریعتر ذرات درشت تر سنگ‌هایی شوند که در اثر پدیده ساییش با آهنگ کمتری خرد می‌شوند. هر چه جرم ذرات درشت‌تر نسبت به ذرات ریزتر بیشتر باشد، انرژی بیشتری جهت خرد کردن آن‌ها مورد نیاز است و بنابراین به گلوله‌های بزرگتری جهت خرد کردن ذرات بزرگتر احتیاج خواهد بود. در صورت عدم شرایط خردایش باعث افزایش خردایش مساحت سطحی ذرات

محصول و تولید نرمه از مشکلات جدی در بخش فرآوری با روش فلوتاسیون است. کاهش چگالی پالپ افزایش سرعت خردایش فشارشی و سایشی را به همراه دارد.

با افزایش ابعاد ذرات خوراک نیاز به گلوله بزرگتر است، ابعاد گلوله رابطه مستقیمی با سختی ماده معدنی و توزیع دانه بندی خوراک دارد. افزایش گلوله باعث کاهش خردایش واسطه سنگی، تولید بیش از حد مواد دانه ریز (تولید نرمه) و تغییر مکانیزم خردایش سایشی به ضربه‌ای را به همراه دارد. گلوله بزرگ باعث کاهش آهنگ خردایش، کاهش راندمان خردایش و افزایش مصرف گلوله می‌شود. گلوله کوچک باعث کاهش آهنگ خردایش ذرات بزرگ و افزایش نرمه می‌شود. معمولاً در آسیای نیمه‌خودشکن مصرف گلوله بین ۵ تا ۱۲٪ متغیر است، ابعاد گلوله‌ها بر حسب شرایط کاری متغیر است و با توجه به نیاز دستگاه ابعاد و تعداد آن متغیر است (نوع پرست و همکاران، ۱۳۸۷).

۲-۴-۳- نقش سرعت آسیا

با افزایش سرعت آسیا، مقداری بالای مواد به بیشترین حد خود می‌رسد. پس از این نقطه، مقدار فوق کاهش یافته تا نقطه‌ای که به صورت سانتریفوژ عمل می‌نماید که در نتیجه مقدار بالای مواد به صفر می‌رسد.

در صورت کاهش حرکت آبشاری مواد در داخل آسیا که به طور غیر قابل اجتنابی در ارتباط با از بین رفتن واسطه خردایش سنگی است. شرایط مناسب برای تولید ذرات ریز فراهم نمی‌شود و در نتیجه محصول درشت‌تری به دست می‌آید (رضایی، ۱۳۷۶).

با افزایش سرعت دستگاه از سرعت بحرانی ذرات در تمام مسیر به آستر آسیا چسبیده و دستگاه به صورت سانتریفوژ عمل کرده و عملاً خردایشی صورت نمی‌گیرد. با کاهش سرعت دستگاه از سرعت بحرانی ذرات در تمام مسیر حرکتی به صورت آبشاری دارد که منجر به تولید محصول دانه درشت

می‌شود. در هر دو حالت بالا عملاً خردایش ناقص خواهد بود که علاوه بر آن باعث سایش سریع و در بعضی مواقع به شکست آسترها را به همراه دارد (نوع پرست و همکاران، ۱۳۸۷).

۲-۵- بهینه سازی و مشکلات مربوط به آن

یکی از مهمترین اهداف مدارهای آسیا کردن به روش تر، تولید محصولی با دانه‌بندی مشخص است که کارایی لازم را در حد بهینه برای مراحل بعدی فرآوری مانند لیچینگ و یا مدارهای فیزیکی پر عیارسازی^۱ داشته باشد. عملکرد اقتصادی فرآیند فرآوری در مجموع، به بازدهی مدارهای لیچینگ و یا دیگر مدارهای پر عیارسازی دارد و پارامترهای متعددی مانند ترتیب و سازماندهی دستگاه‌ها، نحوه عملیات و خواص مربوط به کانسنگ تاثیر قابل توجهی بر دانه‌بندی محصول تولید شده از مدار آسیاها می‌گذارد. یکی از مشکلاتی که به هنگام دستیابی به یک محصول بهینه از مدار آسیایی که در حال کار است باید بدان توجه داشت، طراحی مدار است که خود شامل ترتیب و نحوه قرار گیری و استقرار واحدهای فرآوری و انتخاب یک سری پارامترهای عملیاتی مانند سرعت آسیا کردن، ابعاد هیدروسیکلون و دهانه‌های ورودی، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون است که نمی‌توان در طی عملیات آن‌ها را تغییر داد. از دیگر مشکلات بهینه سازی مدار در مرحله طراحی، انتخاب نوع، تعداد و ابعاد واحدهای موجود در مدار است (Kawatra, ۲۰۰۶).

جدول ۲-۳- عوامل موثر در بهینه سازی پارامترهای عملیاتی در مدار آسیاهای نیمه‌خودشکن

(سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۱)

نحوه بررسی و کنترل	عوامل موثر	مورد بهینه سازی
اندازه‌گیری میزان یا سطح بار آسیا، اندازه‌گیری توان آسیا (انرژی خردایش)، استفاده از مدل‌های توان	توان در دسترس آسیا، حجم آسیا، سرعت چرخش آسیا	تناژ خوراک
کنترل ابعاد محصول و مطالعات فرسایش بار	وزن و ابعاد بار (گلوله)	بار خردکننده

^۱ Concentration

خردکننده		
تغییر ابعاد چشمه‌های سرند کنترل کننده، تغییر مقدار یا ابعاد بار گلوله، تغییر سرعت آسیا، تنظیم ابعاد محصول در مرحله آسیای گلوله‌ای، تغییر ابعاد جدایش در سیکلون در مورد مدار خردایش بسته	مشخصات کانسنگ	ابعاد محصول
تنظیم و برقراری موازنه بین میزان بار آسیا و سرعت دوران آن، استفاده از مدل‌های انرژی و تحلیل حرکت بار درون آسیا	مشخصات کانسنگ، ابعاد خوراک، بار گلوله، مقدار بار آسیا، سرعت آسیا، شکل و ابعاد آستر و بالابرها	مصرف انرژی
کنترل سطح(میزان) بار آسیا، استفاده از حداقل ممکن بار گلوله، کنترل سرعت آسیا به ویژه در شرایط سرعت متغیر	مشخصات کانسنگ، جنس آستر و گلوله‌ها، مقدار بار آسیا، مقدار بار گلوله، سرعت آسیا	مصرف فولاد

مشکل بهینه سازی نحوه ترتیب و قرار یک مدار را می‌توان با مطالعات آزمایشگاهی تا حدودی حل کرد که این روش تا چند دهه اخیر یکی از بهترین روش‌ها محسوب می‌شد ولی این روش بسیار زمان‌بر است و به دلیل طولانی بودن آزمایش‌ها، گران نیز هست. از همه مهمتر، عدم توانایی مدار در مقابل نوسانات و تغییرات بار ورودی نیز از دیگر مشکلات است. ولی در مقایسه با این روش، شبیه سازی روشی است که برای تعیین پارامترهای عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و براساس توصیف و بیان یک سری مدل‌های ریاضی استوار است و چون روشی سریع، ارزان قیمت و دقیق‌تر از روش‌های آزمایشگاهی است لذا برای بهینه سازی کارآیی مدار آسیاها به کار می‌رود. مدل‌ها از نوع فیزیکی و یا ریاضی‌اند. اگر چه مدل از هر نوع که باشد نسبت به واحد واقعی حالتی تقریبی دارد و باید ماهیت چنین تقریبی را در راستای استفاده از مدل به منظور پیش‌گویی کردن کارآیی واحد واقعی در نظر داشت. از آنجا که عملیات در مقیاس نیمه صنعتی به سختی عملیات در سطح صنعتی است. لذا، از نظر تجربی کاربرد مدل‌های فیزیکی را در بهینه سازی مدار مشکل می‌سازد و در نتیجه از مدل‌های کاهش مقیاس فیزیکی نمی‌توان در مسائل بهینه سازی نیز استفاده کرد. مدل‌های ریاضی شامل یک سری معادلاتی هستند که ارتباط و وابستگی بین بار اولیه و محصول را در یک ماشین خاص توصیف

می‌کنند و شامل پارامترهایی هستند که به وسیله آن‌ها می‌توان کلیه متغیرهای عملیاتی را ارزیابی کرد (Kawatra, ۲۰۰۶).

بهینه‌سازی عملیات آسیای نیمه‌خودشکن نباید یک کار تمام‌شدنی به حساب آورده شود بلکه باید همواره به دنبال بهینه‌سازی کارآیی، علیرغم وجود عوامل در حال تغییر بود.

جهت اطمینان از بهینه‌سازی کار کردن مدار خردایش، چند مورد را باید در نظر گرفت: شناخت دقیق آسیا، تعریف شاخص‌های بهینه‌سازی و داشتن برنامه اجرا، شبیه‌سازی.

۱- شناخت دقیق آسیا

سعی شود صددرصد به مستندات ارایه شده برای تعیین مشخصات تجهیزات تکیه نشود بلکه مشاهده شده و کنترل شوند (اصالت داده‌های آزمایشگاهی مشخصا ارزیابی شوند).

ابعاد آسیا: ابعاد داخلی جداره و آستر باید اندازه‌گیری شود. آستر در طول زمان ساییده شده و در نتیجه بر کارآیی تاثیر گذار خواهد بود.

مشخصات شبکه: روزنه‌ها، سطح باز و محل روزنه‌ها در شبکه باید به صورت دقیق رسم شوند.

ابزار بندی: چون اکثر اندازه‌گیری‌ها براساس حسگرهای مختلف می‌باشند، بنابراین لازم است به طور مستمر کنترل شوند. تنظیم باسکول‌ها و اندازه‌گیر توان کشی آسیا باید به طور منظم انجام شود.

۲- تعریف شاخص‌های بهینه‌سازی و داشتن برنامه اجرا

شاخص‌هایی که معمولا مورد توجه قرار می‌گیرند عبارتند از: ظرفیت، ابعاد محصول، توان مصرفی و فلز (گلوله و آستر) مصرفی. تعیین وضعیت کاری مدار در حالت معمول در زمان پایداری با انجام اندازه‌گیری مانند: اندازه‌گیری دبی، دانه‌بندی، درصد جامد جریان‌ها، اندازه‌گیری توان کشی و بار آسیا.

۳- شبیه سازی

در این حالت اطلاعات بدست آمده از مدار، جهت شبیه سازی به کار گرفته می شود. استراتژی های مختلف شبیه سازی قبل از انجام در شبیه سازها می تواند مورد آزمایش قرار گیرد و در صورت مفید بودن به اجرا در آیند (جهانی، ۱۳۸۸).

۲-۵-۱- شاخص های بهینه سازی

ظرفیت: ظرفیت معمولا با توان در دسترس و حجم آسیا محدود می شود. با بررسی سطح بار در وضعیت معمول می توان پی برد که آیا حجمی برای افزایش ظرفیت وجود دارد.

اندازه خردایش: معمولا گلوله بیشتر، بزرگتر و آسیای بلندتر منجر به درشت تر شدن ابعاد محصول می شود. در زمانی که خردایش در دو مرحله (آسیای نیمه خودشکن و گلوله ای) انجام می شود بهتر است که برای بهینه سازی آسیای نیمه خودشکن ظرفیت در نظر گرفته شود و اندازه خردایش مطلوب با کمک آسیای گلوله ای بدست آورده شود. با تغییر روزه های سرند بکار گرفته شده برای خروجی آسیا، می توان از برگشت مجدد مواد خرد شده، به داخل آسیا جلوگیری کرد.

توان مصرفی: توان مصرفی ویژه معمولا به عنوان شاخص کارایی به کار گرفته می شود که تحت تاثیر نوع سنگ معدن، اندازه خوراک، میزان گلوله، سطح بار و سرعت آسیا قرار می گیرد. به طور کلی با افزایش میزان گلوله و بار، توان مصرفی ویژه کاهش می یابد.

مصرف فلز (گلوله و آستر): مصرف فلز بستگی به نوع کانه، مواد آستر و گلوله دارد. معمولا سطح بار کم به دلیل برخورد با آستر و گلوله منجر به مصرف فلز می شود. از طرف دیگر مقدار گلوله زیاد نیز مصرف را افزایش می دهد. در آسیاهایی با موتور دور متغیر، افزایش سرعت باعث افزایش مصرف فلز، در اثر برخورد گلوله به آستر می شود (سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۱).

۲-۶- محاسبات و معادلات توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن

رابطه توان، ابعاد و چگالی بار آسیا (با در نظر گرفتن اثرات سرعت، اصطکاک و دانه‌بندی) به شرح زیر است (سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۱):

$$kW(net) = P_n \cdot \rho_c \cdot DK^{2.5} \cdot L \quad (1-2)$$

$kW(net)$: توان موثر آسیا برحسب کیلو وات

P_n : عدد توان حاصل از اندازه گیری

L : طول موثر آسیا برحسب متر

D : قطر موثر آسیا برحسب متر

ρ_c : چگالی شارژ توده آسیا

K : عدد ثابت

رابطه سرعت بحرانی با سرعت و قطر آسیا به شرح زیر است (سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۱):

$$Cs = 0.0236 \times N \times \sqrt{D} \quad (2-2)$$

Cs : سرعت بحرانی

D : قطر آسیا برحسب متر

N : سرعت دورانی آسیا برحسب دور بر دقیقه

رابطه توان با سرعت آسیا و وزن بار به شرح زیر است (سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۱):

$$kW = \frac{2\pi \cdot N \cdot W \cdot r \cdot c \cdot \sin\theta}{34.035} \quad (3-2)$$

KW : توان آسیا برحسب کیلووات

N : سرعت دورانی آسیا برحسب دور بر دقیقه

W: وزن بار درون آسیا برحسب متر

rc: فاصله شعاعی تا مرکز ثقل بار درون آسیا برحسب متر

θ : زاویه بین سطح بار با شعاع داخلی آسیا

رابطه انرژی ورودی آسیا (خروجی موتور) با دانه‌بندی و قابلیت خردایش ماده معدنی به شرح زیر است

(سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۱):

$$W = \frac{10Wi}{\sqrt{P}} - \frac{10Wi}{\sqrt{F}} \quad (4-2)$$

W: انرژی ورودی به آسیا

P: ابعاد محصول

F: ابعاد خوراک

Wi: اندیس کار

توان آسیا معمولاً در آزمایشگاه تعیین شده و در مقیاس پایلوت بررسی می‌شود. اگر ابعاد آسیای

پیشنهادی صنعتی و آسیای پایلوت (و یا آسیای آزمایشگاهی) مشخص باشد، فاکتور تبدیل مقیاس، از

معادله زیر به دست می‌آید (MacPherson and Turner, ۱۹۸۰):

$$P_m = 1.05 P_{TEST} \left[\left(\frac{L}{L_{TEST}} \right) \left(\frac{D}{D_{TEST}} \right)^{2.65} \right] \quad (5-2)$$

P_m: توان ناخالص آسیای صنعتی (کیلو وات)

P_{TEST}: توان آسیای آزمایشی

L_{TEST} و D_{TEST}: طول و قطر آسیای آزمایشی

L و D: طول و قطر آسیای صنعتی

معادله فوق برای بار گذاری آسیا بین ۲۵ تا ۳۰ درصد قابل کاربرد است. ظرفیت آسیا با تقسیم ۹۰ درصد توان ناخالص آن به توان خردایش خالص به ازای هر تن از آسیای آزمایشگاهی برآورد می‌شود. در مورد آسیاهای خودشکن، توان مصرفی تابعی از قطر و طول آسیا است. برای آسیاهای خودشکن تجاری، توان از رابطه زیر بدست می‌آید (MacPherson and Turner, ۱۹۸۰):

$$P_m = 0.992LD^{2.8}\rho_c \quad (6-2)$$

ρ_c : چگالی شارژ توده آسیا (کانسنگ، گلوله‌ها و آب)

L و D: طول و قطر آسیای صنعتی (متر)

P_m : توان ناخالص آسیای صنعتی (کیلووات)

برخی محققان معتقدند که آسیاهایی با قطر بزرگ‌تر، از لحاظ انرژی کارآتر هستند. انرژی مورد نیاز برای آسیا، مجموع توان مورد نیاز برای بخش مرکزی استوانه‌ای و بخش‌های مخروطی است: توان مورد نیاز برای آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن از رابطه زیر بدست می‌آید (Morrison and Morrell, ۱۹۹۷):

$$P_M = KD^{2.5}\varphi_c \left[1 - \frac{0.1}{2.9-1.0\varphi_c} \right] \rho_c J_c (1 - AJ_c)(1 + F) \quad (7-2)$$

K: مقداری ثابت

J_c : بخشی از حجم آسیا که توسط بار پوشیده شده است.

A: مقداری ثابت

(1+F): ضریب تصحیح بخش‌های مخروطی برای آسیاهای استوانه‌ای

φ_c : تخلخل بستر

ρ_c : چگالی شارژ توده آسیا

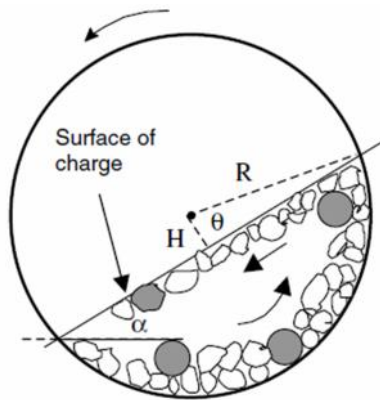
توان آسیا مجموعی از انرژی‌های پتانسیل و جنبشی است. با ترکیب انرژی‌های پتانسیل و جنبشی، توان آسیا از رابطه زیر بدست می‌آید (Hogg and Fuerstenau, ۱۹۷۲):

$$P_M = k \sin \alpha \sin^3 \theta \rho_c \varphi_c L D^{3.5} (1 + \gamma) \quad (۸-۲)$$

در شکل (۵-۲) مقدار زوایای α و θ نشان داده شده است، از رابطه بالا داریم (Hogg and Fuerstenau, ۱۹۷۲):

$$\gamma = 0.188 \left(\frac{\varphi_c}{\sin \alpha} \right) \left(\frac{1 - \cos^4 \theta}{\sin^3 \theta} \right) \quad (۹-۲)$$

این مدل برای بخشی از ذرات که در سطح قرار دارند، به کار گرفته نمی‌شود، اما فرض شده که جریان رو به پایین، از سطح آرام است.



شکل ۲-۵- حرکت ذرات در آسیا مطابق با مدل‌های فورستانو، هوک و آستین (Hogg and Fuerstenau, ۱۹۷۲) آستین تشخیص داده که معادله بالا در ساختار، مشابه قانون باند (Bond, ۱۹۶۱) برای محاسبه توان آسیاهای مرسوم است. بر پایه آن، آستین پیشنهاد داد توان آسیاهای نیمه‌خودشکن می‌تواند با رابطه زیر محاسبه شود:

$$P_M = k D^{3.5} J_c (1 - A J_c) \left(\frac{L}{D} \right) \varphi_c \left(1 - \frac{0.1}{\varphi_c - 1} \right) \rho_c \quad (۱۰-۲)$$

آستین، مقدار $1/0.3$ را برای ثابت A در مقایسه با مقدار پیشنهاد شده توسط باند (۰/۹۳۷) استفاده کرده است در حالی که برخی محققان مقدار $1/0.65$ را پیشنهاد می‌کنند. آستین مقدار ρ_c را برحسب

بخشی از بار آسیا (کانسنگ همراه با آب و گلوله‌ها) و پرشدگی بخشی آسیا در آسیاهای نیمه‌خودشکن مطابق رابطه (۱۱-۲) توسعه داده شده است (Gutierrez and Sepulveda, ۱۹۸۳):

$$\rho_c = \frac{(1-\varphi)J_c\left(\frac{\rho_R}{M_R}\right) + 0.6J_B\left(\rho_b - \frac{\rho_R}{M_R}\right)}{J_c} \quad (11-2)$$

ρ_R : چگالی متوسط کانسنگ (تن بر متر مکعب)

ρ_b : چگالی گلوله‌ها (تن بر متر مکعب) (۸ برای فولاد)

φ : تخلخل بستر

J_c : کسری از حجم بخش استوانه‌ای آسیا که با بار آسیا (کانسنگ و گلوله‌ها) پر شده است.

J_B : کسری از حجم بخش استوانه‌ای آسیا که با گلوله‌ها پر شده است.

M_R : وزن کانسنگ در مجموع شارژ آسیا (کانسنگ و آب)

با در نظر گرفتن $K=10/6$ و $A=1/0.3$ ، آستین (Austin, ۱۹۹۰) معادله نهایی توان آسیا را طبق معادله زیر بدست آورد:

$$P_M = 10.6D^{2.5}L(1 - 10.3J_c) \left[(1 - \varphi) \left(\frac{\rho_R}{M_R} \right) J_c + 0.6J_B \left(\rho_b - \frac{\rho_R}{M_R} \right) \right] \varphi_c \left[1 - \frac{0.1}{3.9 - 1.0\varphi_c} \right] \quad (12-2)$$

با استفاده از قراردادهای زیر می‌توان معادله بالا را ساده‌تر کرد.

الف- تخلخل موثر مجموع شارژ، (۳۰ درصد)

$$\rho_c = \frac{\text{وزن گلوله‌ها}}{0.6\rho_b V} - \text{ب}$$

ج- $M_R=0/8$

توان بدست آمده برای آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن قابل کاربرد است. از این مدل برای کنترل آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن استفاده شده و مشخص شده که مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، با هم مشابه هستند. البته این نتایج، حاصل از تعداد محدودی کارهای آزمایشگاهی بوده است (Neale and Edwards, ۱۹۹۴).

مطالب عمومی زیر را می‌توان در مورد توان مصرفی آسیا بیان کرد (Burgess, ۱۹۸۹):

الف- از آنجا که توان آسیا با $D^{2.5}$ متناسب است، توان مصرفی به ازای واحد حجم آسیا در آسیاهای بزرگ‌تر، از آسیاهای کوچک‌تر بیش‌تر است. ممکن آسیاهای طویل‌تر (نسبت پایین قطر به طول) به دلیل وزن شارژ بیش‌تر، توان بیش‌تری از آسیاهای با نسبت قطر به طول بالاتر مصرف کند. آسیاهای با نسبت قطر به طول پایین، نرمه‌ها را نگه داشته و مواد را بیش‌تر خرد می‌کنند؛ بنابراین کارایی کمتری از آسیاهایی با نسبت بالاتر دارند (تا ۱۶ درصد).

ب- توان مصرفی آسیاهای نیمه‌خودشکن با قطر بزرگتر از ۹ متر، حدود ۱۰ درصد کمتر از توان تئوریک است.

پ- در عملیات تجاری، معمولاً توان آسیا را ۲۰-۱۰ درصد بیش‌تر در نظر می‌گیرند تا برای تغییرات در بارگذاری اولیه ناشی از تغییرات در مشخصات کانسنگ، نرخ خوراک‌دهی و غیره مناسب باشد.

۲-۶-۱- توان نرمال شده (نسبی) آسیا

برای مقاصد طراحی و عملیاتی، باید کارایی آسیاها را مقایسه کرد. روش مناسب برای مقایسه، استفاده از مفهوم توان نرمال شده (نسبی) آسیا است. توان نرمال شده آسیا از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Neale and Edwards, ۱۹۹۴):

$$P_M = (1 - 1.03J_C) \left((1 - \varphi) \left(\frac{\rho_R}{M_R} \right) J_C + 0.6J_B \left(\rho_b - \frac{\rho_R}{M_R} \right) \right) \quad (13-2)$$

ρ_R : چگالی متوسط کانسنگ (تن بر متر مکعب)

ρ_b : چگالی گلوله‌ها (تن بر متر مکعب) (۸ برای فولاد)

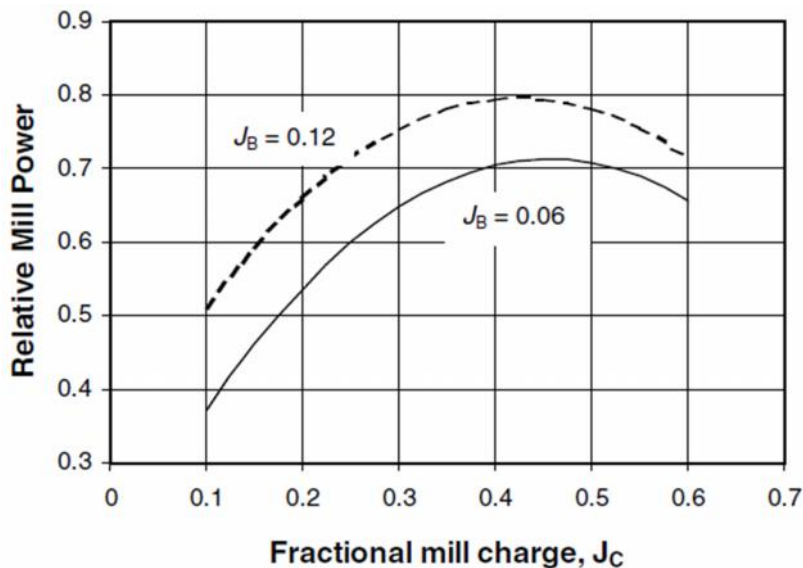
φ : تخلخل بستر

J_C : کسری از حجم بخش استوانه‌ای آسیا که با بار آسیا (کانسنگ و گلوله‌ها) پر شده است.

J_B : کسری از حجم بخش استوانه‌ای آسیا که با گلوله‌ها پر شده است.

M_R : وزن کانسنگ در مجموع شارژ آسیا (کانسنگ و آب)

معادله بالا فاقد شرطی است که مربوط به قطر آسیا باشد؛ بنابراین P_M مستقل از ابعاد آسیا است. رابطه بین بار حجمی آسیا-توان آسیا است که در شکل (۲-۶) نشان داده شده است.



شکل ۲-۶- رابطه بین بار و توان آسیا در دو بارگذاری متفاوت شارژ گلوله (Neale and Edwards, ۱۹۹۴)

۲-۶-۲- توان خالص و توان بدون بار

توان مصرفی مورد نیاز برای بخش استوانه‌ای و بخش‌های مخروطی آسیا به عنوان توان خالص در نظر گرفته می‌شود. توان ناخالص مجموع توان بدون بار و توان خالص است؛ بنابراین $P_M = P_{NL} + P_{NET}$ توان بدون بار اندازه‌ای از توان اتلاف شده در دنده‌ها، یاتاقان‌ها و اجزای الکتریکی است و توان ناخالص مصرفی آسیا هنگامی که بدون بار است، در نظر گرفته می‌شود و محاسبه آن هنگامی که آسیا در حال خردایش است یا هنگامی که جهت تعویض آستر متوقف می‌شود، انجام می‌گیرد. مورل (Morrell, ۱۹۹۶) مدل تجربی زیر را برای توان بدون بار آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن ارائه کرده است:

$$P_{NL} = 1.68AD^{2.05}(\phi_c(0.667L_{CONE} + L_{CYL}))^{0.82} \quad (14-2)$$

P_{NL} : توان بدون بار بر حسب کیلووات برای طول و قطر بر حسب متر

L_{CONE} : قطر آسیا

L_{CYL} : قطر مخروط آسیا

توان خالص مصرفی برابر است با:

$$P_M = KD^{2.5} L_{EFF} \rho_c J_c \left[\frac{5.97\varphi_c - 4.43\varphi_c^2 - 0.985 - J_c}{(5.97\varphi_c - 4.43\varphi_c^2 - 0.985)^2} \right] \varphi_c (1 - (10.954 + 0.135J_c)e^{-19.42(0.945 - 0.135J_c - \varphi_c)}) \quad (15-2)$$

K عدد ثابت (مقدار ۹/۱ برای آسیاهای تخلیه شبکه‌ای و ۷/۹۸ برای تخلیه سرریز)

L_{EFF} طول موثر خردایش

در عملیات آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن رابطه بین بار آسیا و توان مطابق روابط ارائه شده که بعداً توسط مورل به صورت رابطه بالا اصلاح شده است. ملاحظات عمومی زیر مورد توجه است (Morrell, ۱۹۹۶):

- هنگامی که آسیا شروع به کار می‌کند، توان پایین مصرفی پیشنهاد می‌کند که نرخ خوراک دهی باید افزایش یابد.
- توان بالای مصرفی نشان دهنده بارگذاری زیاد است.
- هنگامی آسیا در حال کار است، توان پایین مصرفی نشان می‌دهد که بارگذاری می‌تواند افزایش یابد.
- توان بالای مصرفی می‌تواند نشانه‌ای از تجمع ذرات با ابعاد بحرانی (۵۰ تا ۸۰ میکرومتر) در آسیا باشد.
- در آسیاهای بلندتر که زمان ماند ذرات طولانی‌تر است، اگر ذرات به سرعت بعد از رسیدن به ابعاد مطلوب محصول خارج نشوند، بیش از اندازه خرد شده و نرمه بیش‌تری تولید خواهند نمود که ممکن است برای فرآیندهای بعدی نظیر فلوتاسیون مضر باشد.

- در آسیاهای بلندتر، سگراسیون^۱ بیش‌تری رخ می‌دهد.
 - تغییر نسبت فواصل بالابرها به ارتفاع، نرخ خردایش و توان مورد نیاز را تغییر دهد.
- نکته مهم این است که در عمل، حداکثر توان مصرفی ثابت نیست و توان مصرفی آسیا با شرایط زیر تغییر می‌کند (Morrell, ۱۹۹۶):

الف- بار حجمی

ب- مشخصات کانسنگ (چگالی، سختی، توزیع ابعادی، قابلیت خردایش، قابلیت خردایش خودشکنی و غیره)

پ- چگالی و مشخصات پالپ

ج- نرخ خوراک‌دهی

۲-۷- جمع بندی

در این فصل ابتدا به بررسی پارامترهای درگیر بر روی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن و شرایط کاری این پارامترها بر روی کارایی مدار خردایش پرداخته شد، سپس به بررسی معادلاتی پرداخته شد که از لحاظ تئوریک و تجربی برای محاسبه توان آسیای نیمه خودشکن مرسوم هستند، بعضی معادلات از لحاظ در نظر گرفتن متغیرهای که وابسته به ابعاد دستگاه هستند و بعضی وابسته به شرایط کانسار و بعضی هم بدون در نظر گرفتن ابعاد دستگاه به محاسبه توان می‌پردازد. البته وجود مقادیر ثابتی چون K ، A و غیره که معمولاً هر مولف آن را بیشتر به صورت تجربی به دست آورده که الزامی برای استفاده در نوع دیگری از آسیاهای مشابه نیست و چه بسا که هر دستگاه با توجه به نوع ماده معدنی و شرایط عملیاتی و کارگاهی مقادیر بهینه آن به صورت تجربی متفاوت باشد. معادلات

^۱ Segregation

مورد بررسی از شاخص‌ترین معادلات تئوری و تجربی هستند که برای محاسبه توان مصرفی آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن مورد استفاده قرار می‌گیرند.

فصل سوم:

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

هوش جمعی^۱ شاخه ای از هوش مصنوعی^۲ است که رفتار اجتماعی را مورد مطالعه قرار می‌دهد. ایده اصلی هوش جمعی الهام گرفتن از نظام موجود در طبیعت بوده است. دسته پرندگان، گروه ماهی‌ها، کلونی مورچه‌ها و جمعیت حیوانات، با عکس‌العملها و قابلیت‌هایی نظیر سازمان یافتگی فعالیت‌های جمعی آنها، رفتاری جمعی را بروز می‌کنند که نمی‌توان آن را به آسانی و با فرض عمل نمودن فردی آنها توجیه کرد. این مشاهدات محققین را بر آن داشت تا رفتار جمعی گروه‌های گوناگون طبیعت را به صورت عملی شبیه‌سازی کنند. مطالعه قوانین و روش‌های که قابلیت‌های تصمیم‌گیری گروهی را بهبود می‌داد و الگوهای استخراج شده از کار گروهی و رقابت موجود میان ذرات، به تدریج حوزه‌ای از مطالعات محققین را به خود اختصاص داده و برخی از این رفتارها به نحوی با روابط ریاضی مدل‌سازی شده‌اند (شمس‌کیا، ۱۳۹۱).

مسائل دنیای واقعی ماهیت پویا دارند یعنی در هدف بهینه‌یابی، نمونه مسئله یا در محدودیت یک مسئله بهینه‌یابی تغییراتی رخ می‌دهد، ممکن است بهینه آن مسئله تغییر کند به عبارت دیگر محیط تغییر کرده است. اگر این حالت رخ دهد وفق دادن راه حل با راه حل قدیمی ضروری است. بنابراین، بهتر است که الگوریتم بهینه‌یابی داشته باشیم که قادر باشد به طور پیوسته راه حل را با محیط در حال تغییر وفق دهد و از نتایج بدست آمده گذشته مجدداً استفاده کند. مشکل اصلی الگوریتم‌ها، این است که سرانجام به یک بهینه همگرا می‌شوند و بنابراین تنوع لازم برای اکتشاف به صورت کارا و توانایی لازم را برای وفق‌پذیری با تغییرات محیط از دست می‌دهند. لذا باید الگوریتم‌هایی برای محیط‌های در حال تغییر به کار گرفته شود که قادر به تولید تنوع بعد از یک تغییر، نگهداری تنوع در طول اجرا، حفظ راه‌حل‌های قبلی و استفاده از شیوه‌های چند جمعیتی باشند (شمس‌کیا، ۱۳۹۱).

هنوز تعریف دقیقی که مورد قبول همه‌ای دانشمندان این علم باشد برای هوش مصنوعی ارایه نشده است و این امر به هیچ وجه مایه‌ای تعجب نیست. چرا که مقوله مادر و اساسی‌تر از آن، یعنی خود

^۱ Swarm intelligence

^۲ Artificial intelligence

هوش هم هنوز به طور همه جانبه و فراگیر تن به تعریف نداده است. در واقع، می توان نسل‌هایی از دانشمندان را سراغ گرفت که تمام دوران زندگی خود را صرف مطالعه و تلاش در راه یافتن جوابی به این سوال عمده نموده‌اند که هوش مصنوعی چیست.

اما اکثر تعریف‌هایی که در این زمینه ارایه شده اند بر پایه یکی از ۴ باور زیر قرار می‌گیرند:

- سیستم‌هایی که به طور منطقی فکر می‌کنند.
- سیستم‌هایی که به طور منطقی عمل می‌کنند.
- سیستم‌هایی که مانند انسان فکر می‌کنند.
- سیستم‌هایی که مانند انسان عمل می‌کنند.

۳-۲- الگوریتم‌های تکاملی

الگوریتم تکاملی^۱، الگوریتمی که زیر مجموعه‌ای از محاسبات تکاملی است و در شاخه‌ای هوش جمعی قرار می‌گیرد. این الگوریتم‌ها از برخی مکانیزم‌های طبیعی الهام گرفته‌اند که عبارتند از: تولید، جهش^۲، ترکیب^۳ و انتخاب. راه حل‌های منتخب برای مسایل بهینه‌سازی نقش اجزا را ایفا می‌کنند و تابع هزینه از میان این اجزا و افراد، تصمیم می‌گیرد که چه راه حل‌هایی باقی بمانند. پس می‌توان گفت: الگوریتم‌های تکاملی، رویه‌های جستجوی تصادفی با استفاده از سازوکار ژنتیکی و انتخاب طبیعی هستند. با مروری بر تاریخچه الگوریتم تکاملی مشخص می‌شود ایده‌ای اصلی تمام این نوع الگوریتم‌ها یکی است و به فرض به جمعیتی از افراد بر می‌گردد که فشار محیطی آن‌ها را وادار به انتخاب طبیعی می‌کند و تابعی کیفی برای حداکثر کردن آن چیزی خواهند بود که به صورت تصادفی موجب پدید آمدن مجموعه‌ای از راه حل‌ها و عناصر می‌شود. به کارگیری تابع کیفی به عنوان معیاری

^۱ Evolution Algorithm

^۲ Mutation

^۳ Cross Over

برای هماهنگی در نظر گرفته می‌شود. بر اساس این هماهنگی، بعضی از کاندیداهای بهتر برای ایجاد نسل بعدی انتخاب می‌شوند و این فرایند تا رسیدن به جواب بهینه یا پایان زمان اجرا ادامه می‌یابد، الگوریتم‌های تکاملی کاربردهای مختلفی دارند (میبدی و همکاران، ۱۳۸۸).

معمولاً از این الگوریتم‌ها در توابع بهینه‌سازی استفاده می‌شود. زیرا الگوریتم‌های تکاملی مناسب بهینه‌سازی، تابع ترکیبی هستند و این نقش را با توجه به کروموزم‌هایشان در ارایه راه حل‌ها ایفا می‌کنند. هر فرد می‌تواند رشته‌ای ساده از صفر و یک به پیچیدگی یک برنامه رایانه‌ای باشد. جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس الگوریتم به منظور دست یابی به راه حل بهینه، به ارزیابی افراد می‌پردازد. معمولاً هر راه حل منحصر به همان مسئله است و باید توسط کاربر حمایت و اداره شود. فرایند تکاملی باعث می‌شود تا جمعیت با محیط تطابق بهتری پیدا کند.

اجرای فرایند تکاملی در بسیاری از موارد اتفاقی است. هنگام انتخاب، افراد مناسب‌تر شانس بیشتری نسبت به سایرین دارند. اما معمولاً حتی نامناسب‌ترین افراد هم شانس برای والد و انتخاب شدن دارند. در ترکیب افراد، انتخاب این که قسمت ترکیب شود نیز تصادفی است.

از بحث بالا می‌توان دید که الگوریتم‌های تکاملی به طور اساسی با دیگر روش‌های بهینه‌سازی و جستجوی

مرسوم قدیمی تفاوت دارند. برخی از این تفاوت‌ها عبارتند از:

الگوریتم‌های تکاملی تنها یک نقطه را جستجو نمی‌کنند بلکه جمعیتی از نقاط را به صورت موازی بررسی می‌نمایند.

الگوریتم‌های تکاملی نیاز به اطلاعات ضمنی و دیگر دانش‌های مکمل ندارند و تنها تابع هدف و شایستگی‌هایی مربوطه جهت جستجو تاثیر می‌گذارند.

الگوریتم‌های تکاملی از قوانین در حال تغییر احتمالی بهره می‌برند و نه موارد مشخص و معین.

استفاده از الگوریتم‌های تکاملی به طور کلی خیلی سراسر است زیرا هیچ گونه محدودیتی برای تعریف تابع وجود ندارد.

الگوریتم‌های تکاملی تعداد زیادی از پاسخ‌های قابل قبول را به دست می‌دهند و انتخاب پایانی بر عهده کاربر است (شمس‌کیا، ۱۳۹۱).

۳-۳- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات توسط راسل ابرهارت^۱ (مهندس برق) و جیمز کندی^۲ (روان‌شناس) به عنوان یک روش جستجوی غیر قطعی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح شد، آنها قصد داشتند که با بهره‌گیری از مدل‌های اجتماعی، نوعی از هوش محاسباتی را به وجود آورند که به توانایی‌های فردی ویژه نیازی نداشته باشد. کار آنها منجر به ایجاد الگوریتمی قوی برای بهینه‌سازی به نام الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شد. این الگوریتم از حرکت دسته جمعی پرندگانی که به دنبال غذا می‌باشند الهام گرفته شده است (Kennedy and Eberhart, ۱۹۹۵).

گروهی از پرندگان در فضای به صورت تصادفی دنبال غذا می‌گردند. تنها یک تکه غذا در فضای مورد بحث وجود دارد. هیچ یک از پرندگان محل غذا را نمی‌دانند. یکی از بهترین استراتژی‌ها می‌تواند دنبال کردن پرنده‌ای باشد که کمترین فاصله را تا غذا داشته باشد. این استراتژی در واقع زیر بنای الگوریتم است. هر ذره که حکم یک راه حل را دارد، در الگوریتم PSO معادل یک پرنده از الگوی حرکت جمعی پرندگان تبعیت می‌کند. هر ذره یک مقدار شایستگی دارد که توسط یک تابع شایستگی محاسبه می‌شود. هر چه ذره در فضای جستجو به هدف (غذا) در مدل حرکت پرندگان، نزدیکتر باشد، شایستگی بیشتری دارد. همچنین هر ذره دارای یک سرعت است که هدایت حرکت ذره را بر عهده دارد. هر ذره با دنبال کردن ذرات بهینه در حالت فعلی، به حرکت خود در فضای

^۱ Eberhart

^۲ Kennedy

مسئله ادامه می‌دهد. به این ترتیب است که گروهی از ذرات PSO با آغاز کار به صورت تصادفی به وجود می‌آیند و با به روز کردن نسلها سعی در یافتن راه حل بهینه می‌نمایند. در هر گام، هر ذره با استفاده از دو بهترین مقدار به روز می‌شود. اولین مورد بهترین موقعیتی است که تاکنون ذره موفق به رسیدن آن شده است، موقعیت مذکور شناخته و نگهداری می‌شود، این موقعیت با $pbest$ نمایش داده می‌شود و بهترین موقعیتی که تاکنون توسط گروه ذرات بدست آمده است که این موقعیت با $gbest$ نمایش داده می‌شود (Kennedy and Eberhart, ۱۹۹۵).

پس از یافتن بهترین مقادیر، سرعت و مکان هر ذره با استفاده از معادلات (۱-۳) و (۲-۳) به روز می‌شود.

$$V_i(t+1) = W.V(t) + c_1 r_1 (X_{i,best}(t) - X_i(t)) + c_2 r_2 (X_{g,best}(t) - X_i(t)) \quad (1-3)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (2-3)$$

W ضریب اینرسی (لختی)

$V(t)$ سرعت اولیه ذره قبل از به روز شدن

$X(t)$ موقعیت اولیه ذره قبل از به روز شدن

C_1 بهترین ضریب یادگیری شخصی

C_2 بهترین ضریب یادگیری جمع

r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع نرمال بین (۰ تا ۱)

$pbest$ بهترین موقعیت تجربه شده شخصی

$gbest$ بهترین موقعیت تجربه شده جمع

سمت راست معادله (۱-۳) از سه قسمت تشکیل شده است که قسمت اول، سرعت فعلی ذره است و قسمت های دوم و سوم تغییر سرعت ذره و چرخش آن به سمت بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه گروه را به عهده دارند. اگر قسمت اول در این معادله در نظر گرفته شود، آنگاه سرعت ذرات تنها با توجه به موقعیت فعلی و بهترین تجربه ذره و بهترین تجربه جمع تعیین می شود. به این ترتیب بهترین ذره جمع، در جای خود ثابت می ماند و سایرین به سمت آن ذره حرکت می کنند. در واقع حرکت دسته جمعی ذرات بدون قسمت اول معادله (۱-۳)، فرآیندی خواهد بود که طی آن فضای جستجو به تدریج کوچک می شود و جستجویی محلی حول بهترین ذره شکل می گیرد. در مقابل اگر فقط قسمت اول معادله (۱-۳) در نظر گرفته شود، ذرات راه عادی خود را می روند تا به دیواره محدوده برسند و به نوعی جستجویی سراسری را انجام می دهند (خامسی، ۱۳۸۹).

این ذرات حین حرکت در این فضا دو توانایی ضروری نیز از خود نشان می دهند:

- پارامتری برای ذخیره سازی بهترین موقعیت شخصی (ibest)
- پارامتری برای ذخیره سازی بهترین موقعیت جمعی (gbest)

با تجربه حاصل از این حافظه ها هر ذره برای اعمال تغییر مناسب اطلاعات زیر را دارا می باشد:

بهترین همسایگی که ذره، از طریق ارتباط با زیر مجموعه های گروه آن را به دست می آورد.

بهترین محلی که بهترین راه حلی است که ذره تاکنون تجربه کرده است:

بهترین عمومی که برای همه شناخته شده است و هنگامی که هر ذره بهترین مکان جدیدی را

شناسایی کند، فوراً برای بقیه ذرات، اطلاعات مربوطه را به روز رسانی می کند.

سازماندهی حرکت ذرات شامل تنظیم حرکت یک جز براساس تجربه قبلی خود و حرکت سایر اجزا گروه است. به عنوان مثال یک پرنده از گروه پرندگان براساس عوامل زیر حرکت بعدی خود را تنظیم می‌کند:

پارامتر شناخت فردی (C¹) : این کمیت باعث می‌شود که ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که پیدا کرده است، حرکت کند، این ضریب به عنوان ضریب تحریک به کار می‌رود.

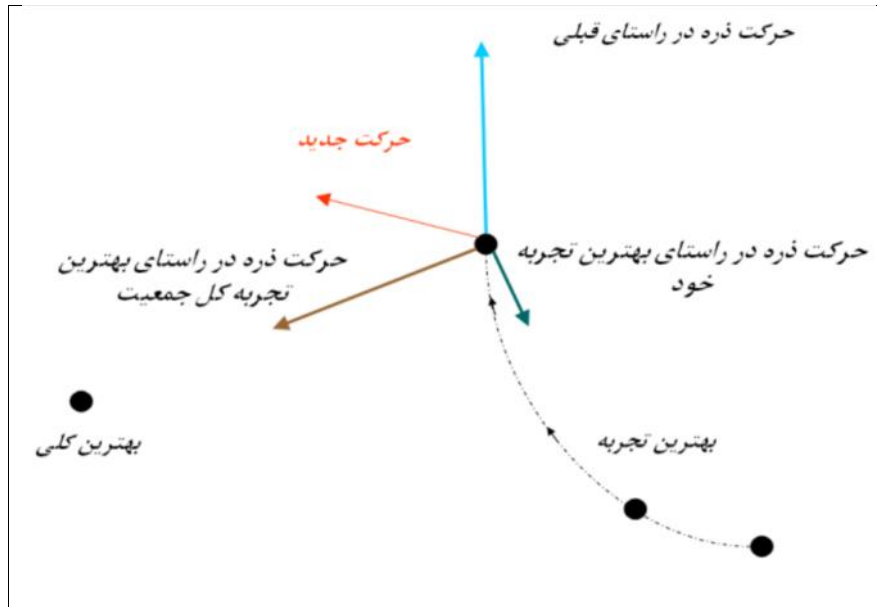
پارامتر شناخت اجتماعی (C²) : این ضریب که با عنوان ضریب تحریک نیز به کار می‌رود، باعث می‌شود که ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که ذرات تا به حال کسب کرده‌اند، حرکت کند.

ضریب لختی یا اینرسی (W) : این ضریب باعث ایجاد تعادل در جستجوی محلی و جستجوی کلی در الگوریتم می‌شود.

مزیت اصلی این الگوریتم پیاده سازی ساده بوده و نیاز به تعیین پارامترهای کمی دارد. همچنین این الگوریتم قادر به بهینه‌سازی توابع هزینه‌ی پیچیده با تعداد زیاد مینیمم محلی است (Kennedy and Shi, 2001).

به منظور این که محدوده همسایگی هر ذره (پرنده / ماهی) تعریف شود طبق آن ذرات مجاور تعیین خواهند شد. پس ترکیب عامل شناختی و اینرسی با رویکرد اول را همسایگی محلی و با رویکرد دوم را همسایگی فراگیر گویند. الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، براساس حرکت گروهی ذرات به سوی بهترین موقعیتی که در گذشته با آن روبرو شده اند، با امید دستیابی به موقعیت بهتر بنا شده است. این الگوریتم نیز جمعیتی از عوامل جستجو (ذرات) را به طور هم زمان برای یافتن حل بهینه به کار می‌گیرد و تفاوت آن با سایر روش‌های جستجوی موازی در نحوه هدایت این دسته جمعی مجازی (نقاط جستجو) می باشد که در آن بیشترین ارزش را داشته است و نیز موقعیت بهترین عضو در کل (ibest) در این روش هر عضو بهترین موقعیت خود را در گذشته‌ها نیز در حافظه دارد. این اطلاعات

به دانش هر عضو از تجربه خود و از عملکرد سایر (ibest) یا در همسایگی خود (gbest) گروه اعضای گروه تشبیه می‌شود. در شکل (۳-۱) نحوه حرکت ذرات در فضای جستجو نشان داده شده است.



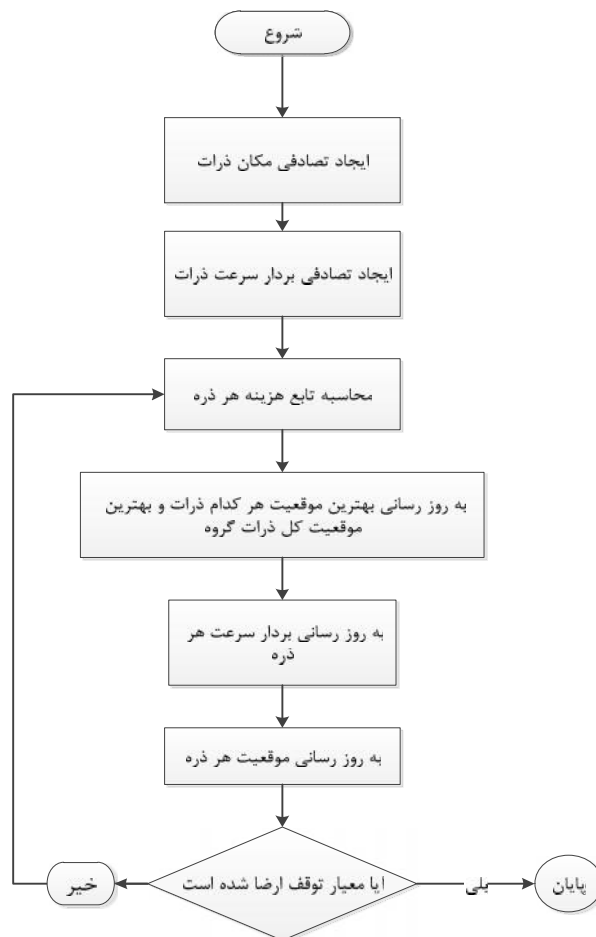
شکل ۳-۱- اساس کار الگوریتم PSO (میبدی، ۱۳۸۸)

طبق روابط (۳-۱) و (۳-۲) باید به این نکته توجه داشت که بزرگ بودن سرعت ماکزیمم ممکن است که ذرات از روی نقطه مینیمم عبور کنند و کوچک بودن آن نیز باعث می‌شود که ذره حول موقعیت خود به چرخش در آمده و قادر به جستجو در فضای آزمون نشود. مقدار سرعت ماکزیمم معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ درصد از محدوده متغیرها انتخاب می‌شود ($V_{max} = -V_{min}$). از طرف دیگر انتخاب مناسب w باعث تکرار کمتر الگوریتم برای رسیدن به نقطه بهینه می‌شود. در الگوریتم‌های معمولی PSO، ضریب w از مقدار (۰/۴ تا ۰/۹) در طول اجرای الگوریتم و براساس رابطه (۳-۳) کاهش می‌یابد (میبدی و شایگان پور، ۱۳۸۸).

$$W = W_{max} - \frac{W_{max} - W_{min}}{iter_{max}} \times iter \quad (3-3)$$

در این الگوریتم انتخاب مناسب C_1 و C_2 از پارامترهای تاثیر گذار است. در بسیاری از مسایل استفاده شده از این الگوریتم، مقادیر C_1 و C_2 به گونه ای انتخاب می‌شوند که $C_1 + C_2 \leq 4$ باشد. $C_1 = C_2 = 2$ در بسیاری از الگوریتم‌ها توصیه شده است.

در این الگوریتم از دو دستور اصلی با نام اکسپلوریشن^۱ به معنی بهره برداری یا استخراج و اکسپلوژیشن^۲ به معنی جستجو یا اکتشاف استفاده می‌شود، دستور اکتشاف توانایی تولید پاسخ‌های جدید را دارا بوده و دستور استخراج توانایی پروراندن پاسخ‌های فعلی را داراست. با افزایش ضریب اینرسی مقدار اکتشاف بالا می‌رود و هر چه پایین‌تر آید مقدار استخراج بالا می‌رود، هر چقدر ضرایب C_1 و C_2 به شدت افزایش یابد باعث بهبود و افزایش اکتشاف شده و اگر به شدت کاهش یابد باعث افزایش استخراج می‌شود. معمولاً در برنامه نویسی از دستور اکتشاف زیاد شروع شده و کم کم به استخراج میل می‌کند (کلامی، ۱۳۸۸). در شکل (۳-۲) فلوجارت استاندارد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نشان داده شده است.



شکل ۳-۲- فلوجارت استاندارد الگوریتم PSO (Kennedy and Shi, ۲۰۰۱)

^۱ Exploitation

^۲ Exploration

برای بهبود نتایج در حل مسایل می توان از تنظیمات زیر استفاده کرد:

کاهش نزولی مقدار ضریب اینرسی (W): ابتدا ضریب اینرسی را یک در نظر گرفته و سپس آن را در مقدار ۰/۹۹ در هر تکرار ضرب کرده به طوری که با هر تکرار مقدار ضریب اینرسی کاهش می یابد تا برنامه به نتیجه مد نظر برسد و از دور تکرار خارج شود.

استفاده از درجه نیمه لگاریتمی^۱: برای این که میزان تغییرات را به طور واضح تری دید و تغییرات آن را مشاهده کرد از محور نیمه لگاریتمی استفاده می شود.

تعیین ضرایب C_1 و C_2 : در الگوریتم اصلاح شده بهینه سازی ازدحام ذرات که توسط کندی بر روی چندین تابع محک بدست آمد، معلوم شد که بهترین مقادیر برای ضرایب بیان شده (۱/۴۹۶۲) $(C_1=C_2=)$ است.

محدود کردن سرعت: برای جلوگیری از واگرایی و افتادن در نقاط بهینه محلی از این دستور می توان استفاده کرد. برای حد بالای سرعت، بیشترین مقدار سرعت را از کمترین مقدار سرعت کم کرده و باقیمانده را در یک دهم ضرب می کنیم و برای حد پایین سرعت آن را مساوی منفی حد بالای سرعت قرار می دهیم.

کاربرد اثر آینه ای یا انعکاسی^۲: هنگامی که از فضای جستجو تعیین شده در برنامه ذرات خارج شوند از این دستور بر معکوس کردن حرکت ذرات در محدوده تعیین شده استفاده می شود.

۳-۴- شبه کد الگوریتم PSO

یک ذره در هر مرحله زمانی باید به یک موقعیت جدید جابجا شود. این جابجایی با تنظیم سرعت ذره انجام می شود. تنظیم سرعت به این قرار است: سرعت فعلی به علاوه سهم وزن یافته تصادفی در جهت بهترین موقعیت منفرد هر ذره به علاوه سهم وزن یافته تصادفی در جهت بهترین موقعیت موجود در

^۱ Semilog

^۲ Velocity Mirror Effect

همسایگی ذره. تنظیم موقعیت هم به این قرار انجام می‌شود: مقدار قدیمی موقعیت به علاوه سرعت. در این قسمت شبه کد بیان شده آورده شده که این کد برای مدل اولیه الگوریتم ازدحام ذرات است (کلامی، ۱۳۸۸).

```
For each particle
Initialize particle
End For

For each particle
Calculate fitness value of the particle fp
/*updating particle's best fitness value so far*/
If fp is better than pBest
set current value as the new pBest
End For

Set gBest to the best fitness value of all particles

For each particle
Calculate particle velocity according equation (۱)
Update particle position according equation (۲)
While maximum iterations OR End For
Minimum error criteria is not attained
```

مراحل کار الگوریتم PSO

- ۱- ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن
- ۲- تعیین بهترین خاطره های شخصی و بهترین خاطره جمعی
- ۳- به روز رسانی سرعت و موقعیت
- ۴- در صورت برآورده نشدن شرایط توقف، بازگشت به مرحله دو

شرایط خاتمه (توقف):

۱- رسیدن به حد قابل قبولی از پاسخ

۲- سپری شدن تعداد یا تکرار زمان مشخص

۳- سپری شدن تعداد و تکرار زمان مشخص بدون مشاهده تاثیر خاصی در نتیجه

۴- بررسی شدن تعداد مشخصی از پاسخ ها

معمولاً شرایط توقف براساس تعداد تکرار یا زمان مشخص تعیین می‌شود، زمانی که با تعداد تکرارهای بیش از حد مشخص شده تاثیر خاصی بر روی جواب نداشته باشد، در این حالت برنامه دچار تعداد تکرار رکود^۱ شده به عبارتی میزان تکرار بیش حد مجاز بوده و توجه کننده بهبود نتایج به ازای افزایش تکرار نیست.

از ویژگی‌های الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، وجود جریان اطلاعاتی است که در هر دوره تکرار می‌توان جواب حاصله را با جواب‌های قبلی ارزیابی کرد و بهترین جواب بهینه شخصی را نسبت به بهترین بهینه کلی ارزیابی کرده و بهترین پاسخ را به عنوان بهینه کلی در نظر گرفت، برای این کار از تعداد ارزیابی تابع^۲ استفاده می‌شود که در حالت اولیه نتیجه صفر بوده و با شروع تکرار به طور مداوم به ارزیابی نتیجه حاصله با بهینه شخصی و بعد بهینه کلی می‌پردازد (کلامی، ۱۳۸۸).

برای واضح تر شدن کاربرد الگوریتم مورد نظر، از این الگوریتم به حل یک معادله ریاضی ساده می‌پردازیم. معادله مورد نظر معادله اسفیر^۳ است که می‌خواهیم این تابع را کمینه کنیم که مقدار مینیمم آن صفر است.

Function $z = \text{Sphere}(x)$;

^۱ Stull iteration

^۲ Number of function evaluation

^۳ Sphere

Cost Function: $Z = \text{Sum}(x.^2)$;

Min $z = F_{\text{sphere}}(x)$;

$$F_{\text{sphere}} = \sum_{i=1}^n x_i^2$$

Min $z = \cdot$

برای این کار ابتدا تابع مورد نظر را تعریف می‌کنیم که همان تابع هدف برنامه خواهد بود و سپس آن را به الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات معرفی می‌کنیم. بعد از تعریف تابع باید پارامترهای الگوریتم را تنظیم کرد که به ترتیب زیر است:

ابتدا تعداد متغییر تصمیم را معلوم کرده و بعد آن را به صورت یک ماتریس ستونی یا سطری تعریف می‌کنیم، بعد مشخص شدن تعداد متغییرهای مسئله حد بالا و حد پایین متغییرها را معلوم می‌کنیم.

بعد از معلوم شدن متغییرهای مسئله، پارامترهای الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات را تنظیم می‌کنیم، پارامتر اول بیشترین تعداد تکرار الگوریتم است که معمولا از شرطهای توقف هم است، بعد تعداد جمعیت اولیه را است که معمولا بین ۵۰ تا ۱۰۰ در نظر می‌گیرند که از ابتدای شروع الگوریتم کم بوده و بعد برای بهبود نتایج کم کم افزایش می‌یابد، پارامتر بعدی ضریب اینرسی است که معمولا از همان دستور کاهش نزولی این ضریب استفاده می‌شود که تعیین مقدار مناسب آن از افتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند. پارامتر بعدی ضرایب یادگیری شخصی و جمعی است که در الگوریتم اولیه مقدار آن ۲ بود ولی در الگوریتم اصلاح شده آن از مقدار $(C_1=C_2=1,4962)$ استفاده می‌شود و در نهایت مقادیر I_1 و I_2 که از توزیع نرمال بین (۰ تا ۱) تعیین می‌شود.

بعد این که پارامترهای الگوریتم تعیین شد به ساختار اصلی الگوریتم وصل شده و الگوریتم شروع به جستجو در فضای تعیین شده می‌کند و در مرحله آخر یعنی نتایج می‌توان خروجی را یک عدد یا نمودار و غیره تعریف کرد که آنرا بعد از اجرای برنامه نشان دهد.

بعد از چندین بار اجرای برنامه و تنظیم ضرایب مقدار نتیجه حاصله از برنامه برای تابع اسفیر که مینیمم آن در حالت مطلق صفر است، برابر با $0,0000001$ که این مقدار تقریبی نسبت به مقدار واقعی نزدیک است و این مناسب بودن کار الگوریتم را نشان می‌دهد.

$$\text{Best cost} = 0,0000001$$

$$\text{Itmax} = 1000$$

$$\text{NFE} = 30400$$

۳-۵- جمع بندی

در این فصل ابتدا به بررسی هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تکاملی بیان شد و سپس به تشریح الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات که یکی از الگوریتم‌های تکاملی است پرداخته شد. در آخر هم به توضیح یک مثال ساده ریاضی برای واضح تر شدن کاربرد الگوریتم مورد نظر پرداخته شد تا هم پارامترهای الگوریتم معلوم شود و هم قدرت تخمین آن مورد بررسی قرار گیرد که نتیجه بدست آمده از الگوریتم با مقدار واقعی نزدیکی مناسبی دارد.

فصل چهارم:

مروری بر تحقیقات انجام شده

۴-۱- مقدمه

آسیاهای نیمه‌خودشکن نیز همان آسیاهای خودشکن هستند، که در آنها برای افزایش نرخ کاهش ابعاد ذرات خوراک، از گلوله‌های خردکننده استفاده می‌شود و خردایش صرفاً ناشی از کنش و واکنش ذرات بر روی هم نیست. در یک آسیای نیمه‌خودشکن، ۱۰-۵ درصد حجم آسیا توسط گلوله‌ها اشغال می‌شود، در صورتی که این عدد در آسیای گلوله‌ای به ۴۵-۲۵ درصد می‌رسد. در آسیای خودشکن و نیمه‌خودشکن درشت‌ترین ذرات خوراک، به عنوان بار خرد کننده عمل می‌کنند، در صورتی که در آسیای قلوه‌سنگی^۱، بخش میانی خوراک، بار خردکننده را تشکیل می‌دهد. یکی از مهم‌ترین جذابیت‌های این آسیاها امکان حذف حداقل یک مرحله سنگ شکنی از مدارهای مرسوم است که سبب کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای در طراحی کارخانه خواهد شد. آسیاهای نیمه‌خودشکن برای خردایش کانسنگ‌های طلا و مس که کوارتز، سنگ‌های فوق بازیک و یا سایر کانسنگ‌ها، میزبان آنها هستند به طور گسترده‌ای استفاده شده‌اند (رضایی، ۱۳۷۶).

ذرات در پاشنه بار آسیا ضربه را از سقوط و سایر بارهای خردکننده دریافت می‌کنند. ذرات موجود در بدنه بار آسیا نیز از ارتفاع‌های مختلف می‌لغزند و در اثر سایش، خرد می‌شوند. عملیات آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن شامل استفاده از بار خردکننده ارزان‌تر به عنوان جایگزین گلوله‌های فولادی است، که تاثیر زیادی بر سایش آسترها دارند، و از لحاظ عملیاتی ارزان‌تر خواهند بود. برای ارزیابی امکان استفاده از خردایش خودشکنی یا نیمه‌خودشکنی در هر مورد خاص، تاکید زیادی بر انجام آزمایش‌های مورد نیاز شده است. در این باره فاکتورهایی که باید جهت دستیابی به معیارهای طراحی مناسب این نوع مدار خردایش مد نظر قرار گیرند، با جزییات کامل مورد بحث قرار گرفته‌اند. با

^۱ Pebble Mill

بررسی نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، کاربرد موفق‌تری برای این نوع خردایش نتیجه می‌شود. بنابراین ارزیابی دقیق نتایج آزمایش‌ها و استفاده از روش علمی مهندسی در طراحی فلوشیت و انتخاب تجهیزات بسیار مهم است (رضایی، ۱۳۷۶).

در آسیاهای گلوله‌ای بار داخل آسیا از گلوله‌های بزرگ فلزی و ذرات نسبتاً ریز سنگ معدن تشکیل شده است. به دلیل سختی گلوله‌ها، ابعاد آن‌ها به طور آهسته و قابل پیش‌بینی کاهش می‌یابد. این مسئله باعث ایجاد حجم بار و توزیع دانه بندی ثابت در داخل آسیا می‌شود. در نتیجه پیش‌بینی عملکرد آسیاهای گلوله‌ای به سادگی امکان‌پذیر می‌باشد. این وضعیت کاملاً برخلاف آن چیزی است که در آسیاهای خودشکن اتفاق می‌افتد و به مقدار کمتری برای آسیاهای نیمه‌خودشکن نیز متفاوت می‌باشد، چرا که در آسیاهای نوع خودشکن و نیمه‌خودشکن توزیع دانه بندی خوراک ورودی و سختی آن، حجم و توزیع دانه بندی واسطه خردایش را تعیین می‌کند. هم‌چنین مکانیزم خردایش غالب و نحوه حرکت دوغاب در داخل آسیا، در آسیاهای گلوله‌ای و آسیاهای نوع خودشکن و نیمه‌خودشکن با یکدیگر تفاوت دارد. باند، قابلیت خردایش مواد را با اندیسی به نام اندیس کار مشخص کرده است و از آنجا که هر جسمی اندیس کار مشخصی دارد لذا می‌توان رابطه‌ای بین انرژی لازم برای خرد کردن و میزان خرد کردن به دست آورد. آگاهی از قابلیت خردایش مواد یکی از مهم‌ترین داده‌های لازم برای طراحی سیستم‌های خردایش است. در واقع بیان‌کننده بسیاری از پارامترهای مکانیکی مواد از جمله سختی، الاستیسیته، پلاستیسیته، مقاومت و تخلخل است و با ناهمگن شدن مواد پیچیدگی آن نیز بیشتر می‌شود (نعمت‌الهی، ۱۳۸۴).

۴-۲- پروژه‌های اجرا شده در مناطق مختلف جهان

در این بخش به معرفی چند پروژه که بر روی توان مصرفی و شریط کاری آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن که با روش‌های مختلف کار شده است پرداخته و نتایج آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

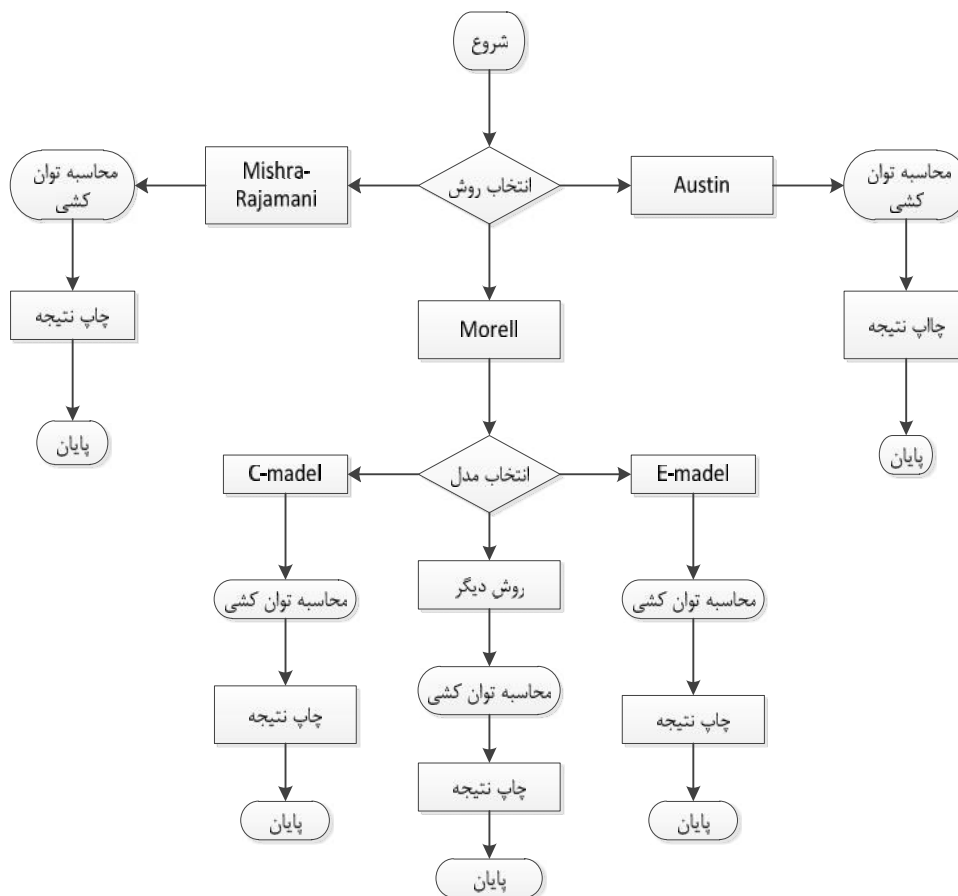
۴-۲-۱- مدل سازی ریاضی توان کشی در آسیاهای گردان

هزینه‌های توان کشی آسیاهای، بیش از نیمی از هزینه‌های عملیاتی کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی را به خود اختصاص می‌دهند. بر این اساس روشی که بتواند میزان آسیا را پیش بینی نماید برای طراحان و گردانندگان کارخانه بسیار قابل اهمیت است. پروژه‌ای که هدف آن توسعه نرم افزاری مستقل برای مدل سازی ریاضی و محاسبه توان کشی آسیاهای مختلف بر اساس مشخصات طراحی و عملیاتی آنها بوده است، ارایه می‌کند (خندان و فرزندگان، ۱۳۸۸). به طور کلی، در برنامه کامپیوتری توسعه یافته توسط نویسندگان مقاله الگوریتمی برای محاسبه توان کشی سه نوع آسیاهای گلوله‌ای، خودشکن و نیمه خودشکن تهیه و پیاده سازی گردید. الگوریتم مزبور براساس تحقیقات و یافته‌های مورل، آستین، میشر و راجامانی در این زمینه طراحی شده است. اغلب مطالعات نشان داده است که توان کشی آسیاهای گردان به پارامترهای همچون سرعت آسیا، طول و قطر آسیا، وزن مخصوص کانه و گلوله‌های فولادی، نسبت پر شدگی آسیا با گلوله و شارژ نهایی و نوع تخلیه (سرریز یا شبکه‌ای) وابسته است. با بررسی تاثیر این پارامترها، توان کشی آسیاهای گردان به صورت روابط ریاضی مدل سازی شده و در نهایت به صورت برنامه‌ای به زبان ++C در آمده‌اند. دقت این مدل‌ها با مراجعه به داده‌های حاصل از محدوده وسیعی از آسیاهای صنعتی ارزیابی شده است (خندان و فرزندگان، ۱۳۸۸).

در ابتدا مدل‌های ریاضی توان کشی به این صورت بیان شده است، مدل آستین برای آسیاهای نیمه خودشکن استوانه‌ای و نیز مخروطی بیان شده است، بعد مدل مورل به سه روش مرحله‌ای، روش ریاضی و روش تجربی بیان شده و در نهایت مدل میشر^۱ و راجامانی^۱ که ساده‌ترین روابط را داراست

^۱ Mishra

بیان شده است. در مرحله بعدی، مدل‌های آرایه شده به زبان C++ برنامه نویسی شدند. در شکل (۴-۱) الگوریتم پیاده سازی شده در این تحقیق نشان داده شده است. اعتبار روابط استفاده شده در الگوریتم پیاده سازی شده توسط مدل‌سازان مورد تحقیق قرار گرفته است و آن‌ها نشان داده‌اند که توان کشی محاسبه از مدل‌ها تا حد زیادی با توان واقعی مطابقت دارد. در نتیجه با استفاده از نرم افزار توسعه یافته، توان کشی آسیاهای گردان نظیر آسیاهای گلوله‌ای، خودشکن و نیمه‌خودشکن، با توجه به مدل‌های متفاوت از فرمول‌های مختلف با پارامترهای خاص هر فرمول قابل محاسبه است. به این ترتیب کاربر می‌تواند توان کشی احتمالی آسیای مورد نظر را با استفاده از مدل‌های مختلف مورد مطالعه قرار دهد و از آنها در طراحی و بهینه‌سازی استفاده نماید (خندان و فرزنانگان، ۱۳۸۸).



شکل ۴-۱- نمودار جریان برنامه محاسبه توان کشی (خندان و فرزنانگان، ۱۳۸۸)

جدول ۴-۱- مقایسه توان‌های مختلف محاسبه شده با مدل‌های مختلف ارائه شده (خندان و فرزنانگان، ۱۳۸۸)

توان ناخالص (kW)	توان بدون بار (kW)	توان خالص (kW)	
۴۳۳۸	۳۲۲	-	مدل C
۴۲۱۶	۳۲۲	-	مدل E
۳۷۹۰	۵۴۰	۲۶۶۳	مدل دیگر
-	-	۳۲۲۹	مدل آستین

۴-۲-۲- شبیه سازی توان مصرفی توان آسیای نیمه خودشکن کارخانه

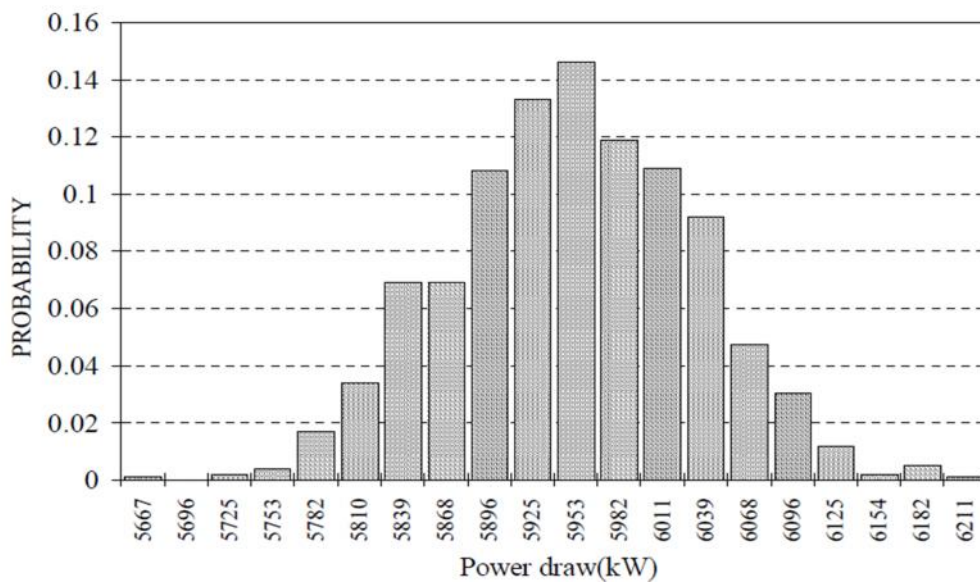
تغلیظ سرچشمه

یکی از راه‌های مطمئن تحلیل عملیات، شبیه سازی ریاضی با کمک اطلاعات موجود می‌باشد. نتایج شبیه سازی رایانه‌ای که براساس پارامترهای متغیر درگیر در عملیات حاصل می‌شوند، آنالیز ریسک و تحلیل حساسیت پارامترهای دخیل می‌باشند. با کمک نتایج حاصل می‌توان با اطمینان بالای، احتمال ایجاد نوسانات سیستم را بدست آورد. در این تحقیق، با کمک شبیه سازی اطلاعات عملیاتی مربوط به شش پارامتر دخیل در توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن کارخانه تغلیظ مس سرچشمه با استفاده از روش لاتین هایپر کیوب پارامترهای موثر اصلی با کمک تحلیل حساسیت شناسایی شده و احتمال مقادیر مختلف توان مصرفی در شرایط مختلف عملیاتی بدست آمد (کارآموزیان و همکاران، ۱۳۸۷).

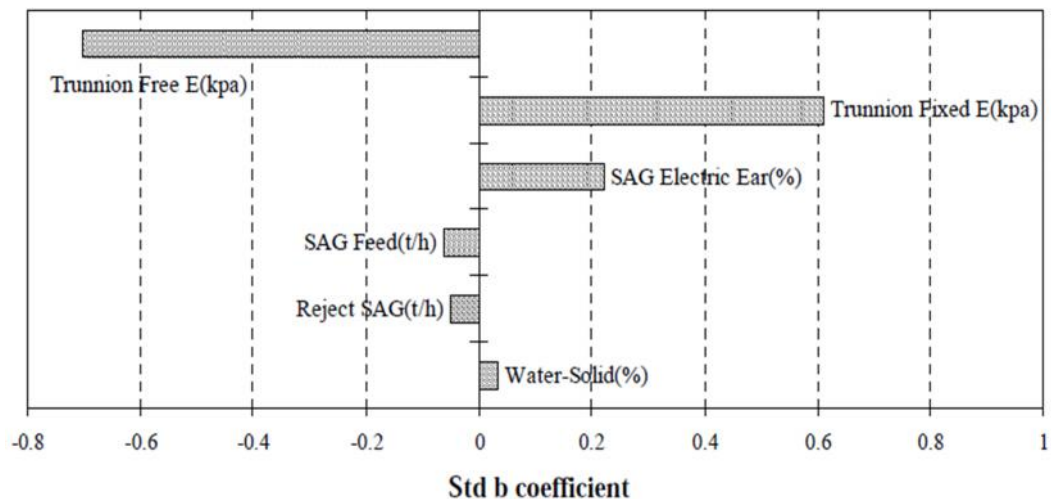
در این مطالعه از روش لاتین هایپر کیوب که یکی از حالات مونت کارلو می‌باشد، استفاده شد. روش لاتین هایپر کیوب به دلیل پوشش دادن کل سطح تابع توزیع دارای دقت بالاتری بوده و نیز به دلیل عدم انتخاب مجدد مقادیر تصادفی دارای سرعت شبیه سازی بالاتری نسبت به روش مونت کارلو می‌باشد. برای این کار ابتدا با استفاده از بانک اطلاعاتی مربوط به آسیای نیمه خودشکن کارخانه تغلیظ مس سرچشمه پارامترهای عملیاتی آسیا بصورت میزان باردهی خوراک، درصد مواد برگشتی به آسیا، درصد جامد، درصد آسیای که میزان پرشدگی را نشان می‌دهد و فشار سر آزاد و سر ثابت آسیا که نحوه قرار گیری بار داخل آسیا را نشان می‌دهند، به عنوان پارامترهای ورودی و موثر بر توان آسیا انتخاب شدند. در مرحله بعد تابع توزیع پارامترهای ورودی را با کمک نرم افزار Best Fit حاصل شدند.

با کمک نرم افزار @Risk شبیه سازی لاتین هایپر کیوب برای توان مصرفی آسیا براساس ۶ پارامتر ورودی انجام شد. در نتیجه توزیع احتمال توان مصرفی بصورت نمودار شکل (۴-۲) به دست آمد (کارآموزیان و همکاران، ۱۳۸۷).

با کمک نتایج شبیه سازی می توان حساسیت توان مصرفی را نسبت به پارامترهای ورودی به دست آورد، همان طور که در شکل (۴-۳) دیده می شود، پارامترهای فشار سرآزاد و سرثابت آسیا و درصد صدای آسیا دارای بیشترین تاثیر بر توان آسیا می باشند که این نتیجه قابل قبول می باشد. زیرا این پارامترها مستقیماً بر نحوه قرار گیری بار داخل آسیا و میزان پرشدگی آن تاثیر دارند بنابراین بر توان آسیای نیمه خودشکن که کاملاً متأثر از بار می باشد تاثیر بارز و شاخص دارند.



شکل ۴-۲- نمودار توزیع احتمال توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن (کارآموزیان و همکاران، ۱۳۸۷)



شکل ۴-۳- نمودار آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی (کارآموزیان و همکاران، ۱۳۸۷)

با کمک نتایج شبیه سازی و توزیع احتمال پارامتر خروجی می توان آنالیز ریسک توان مصرفی را انجام داد. در این حالت احتمال این که توان مصرفی در ۷۵ درصد موارد در محدوده بهینه قرار گیرد، باید دو پارامتر اصلی، یعنی فشار سر آزاد و سر ثابت آسیا به ترتیب در مقادیر ۴۷۹۲ و ۵۲۴۱ کیلو پاسکال قرار گیرند و برای احتمال بیش از ۹۰ درصد مقادیر این دو پارامتر عبارتند از ۴۷۳۰ و ۵۲۸۷ کیلو پاسکال و اگر این دو پارامتر مقادیر ۵۰۳۴ و ۴۹۹۳ کیلو پاسکال را حاصل کنند، احتمال وقوع توان مصرفی بهینه به کمتر از ۲۵ درصد کاهش می یابد. در نهایت با کنترل مناسب و دقیق فشار سر آزاد و سر ثابت آسیا که خود متاثر از نحوه بار دهی آسیا می باشند به راحتی می توان توان مصرفی آسیا را کنترل نمود و در نتیجه به میزان زیادی در تولید انرژی صرفه اقتصادی ایجاد نمود (کارآموزیان و همکاران، ۱۳۸۷).

۴-۲-۳- بهینه سازی زمان واقعی آسیای نیمه خودشکن با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۱

در این مطالعه با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به بهینه سازی زمان واقعی (RTO)^۱ آسیای نیمه خودشکن صنعتی پرداخته شده است. برای طراحی بهینه سازی زمان واقعی از یک مدل

^۱ Genetic Algorithm

دینامیکی درون خطی (متصل) برای وفق دادن و اعتبار سنجی^۲ با نتایج واقعی بر روی پارامترهای ناپایدار استفاده شد. شرایط تعریف شده برای تابع هدف ماکزیمم کردن تناژ کانه یا تولید محصولی دانه ریز با توجه به میزان توان مصرفی آسیا است. هدف اصلی در این مقاله افزایش عملکرد تابع سازگاری^۳ در الگوریتم ژنتیک است. نتایج نشان می‌دهد که کنترل مستقیم بعضی از پارامترها به طور مستقیم در بهبود سیستم تاثیر دارند که عبارتند از: نرخ بیشینه کانه در خوراک اصلی، محدودیت جریان فعال در سیستم، توان مصرفی که همچنین بر روی تابع هدف تعریف شده تاثیر دارد (Salazar et al, ۲۰۰۸). اگرچه پیش از این از روش الگوریتم برنامه‌های غیر خطی (NLP)^۴ برای توصیف شرایط مورد نظر توسط ادگارد و همیل بلاو^۵ استفاده شد، ولی به دلیل این که شرایط تعریف مسله حالتی دینامیکی دارد و شرایط کاری مداوم در حال تغییراتی است نمی‌توان با قطعیت بالا نقطه بهینه‌ای که از این الگوریتم به دست آمد را نقطه بهینه سراسری در نظر گرفت، اما نتایج حاصله از الگوریتم ژنتیک با نتایج بدست آمده در آزمایشگاه تطابق بیشتری داشته است که اگر تابع هدف مورد نظر دقیق انتخاب شود جواب حاصله را می‌توان تا حد بالای نقطه بهینه سراسری در آن بازه زمانی مشخص در نظر گرفت (Salazar et al, ۲۰۰۸).

در این مقاله از مدل تعمیم داده شده الگوریتم ژنتیک که توسط گلدبرگ^۶ در سال ۱۹۸۹ بیان شد استفاده شد، در این کار برای بهینه سازی زمان واقعی یک آسیای نیمه‌خودشکن بر روی کانه مس استفاده شد. محدودیت موجود در تعریف تابع هدف، یکی توان مصرفی آسیا و دیگری نرخ پرشدگی است. نتایج پیش بینی مدل با داده‌های واقعی برای مقدار توان مصرفی و خوراک ورودی در شکل (۴-۴) نشان داده شده است.

^۱ Real Time Optimization

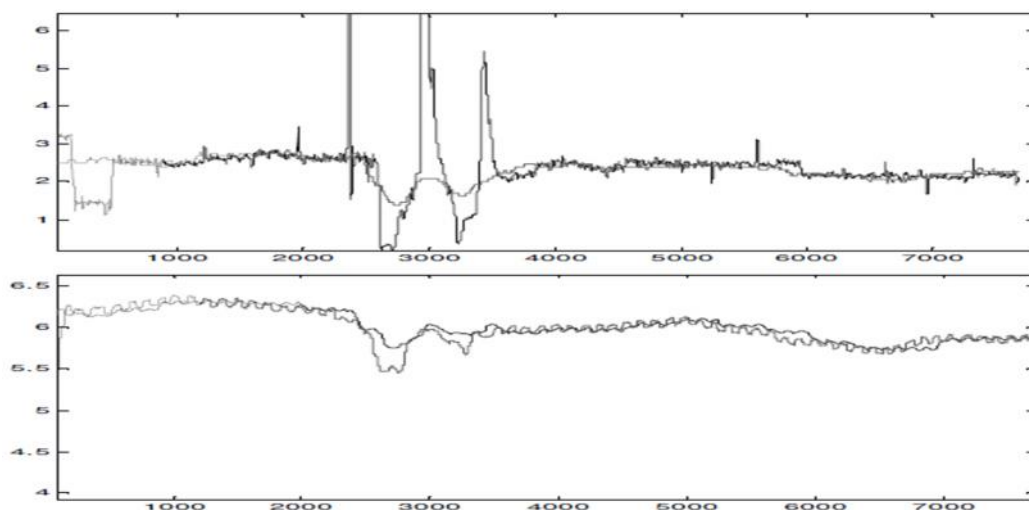
^۲ Validate

^۳ Fitness Function

^۴ Nonlinear Programming

^۵ Edgard & Himmelblau

^۶ Goldberg



شکل ۴-۴- مدل پیش بینی و واقعی آسیای نیمه خودشکن (بالا: توان مصرفی (MW) و پایین: قلوه سنگ (Ton/m))

در این مطالعه برای بهینه سازی زمان واقعی یک آسیای نیمه خودشکن صنعتی یک مدل دینامیکی با پارامترهای اصلی توسعه داده شد. برای حل این مسئله بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک با سه متغیر تصمیم استفاده شد. شرایط تابع هدف براساس ماکزیمم کردن تناژ کانه یا تولید محصولی دانه ریز با توجه به توان مصرفی در نظر گرفته شد، که بر این اساس تابع سازگاری برای عملکرد این پارامترها تعریف شد. نتایج نشان داد با بررسی نرخ خوراک ورودی و سرعت چرخش آسیا و تاثیر مستقیم آنها بر روی توان مصرفی آسیا تا ۵۰ درصد می توان ضریب عملکرد جهانی آسیا را پیش بینی و نتایج را بهبود بخشید.

۴-۲-۴- تعیین روابط بین پارامترهای ورودی در مدل سازی توان مصرفی

آسیای نیمه خودشکن

از شبکه های عصبی^۱ برای مدل سازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن استفاده شده است. در این مطالعه برای پیش بینی توان مصرفی آسیا به بررسی روابط بین پارامترهای که به صورت مستقیم و غیر مستقیم تاثیر دارند پرداخته شده است، در مدل اولیه از شش پارامتر ورودی استفاده شد که

^۱ Neural Network

عبارت بودند از: چگالی آسیا، فشار یاتاقان، میزان چرخش در دقیقه، میزان صدا، میزان بازیافت^۱ و نرخ خوراک. مدل حاصله از این شش پارامتر با ضریب همبستگی (۰/۸۷) تا میزان ۹۰ درصد با میزان پراکندگی ۵ درصد پیش بینی کرد. در مدل دیگر با سه پارامتر ورودی شامل میزان چرخش در دقیقه، میزان بازیافت و نرخ خوراک که مدل حاصله از این سه پارامتر با ضریب همبستگی (۰/۹۱) تا میزان ۹۶/۲ درصد با میزان پراکندگی ۵ درصد پیش بینی کرد که با توجه به مدل قبلی روند نتایج بهبود یافت (Kawatra, ۲۰۰۶).

در کارخانه فرآوری بزرگ‌ترین و پر مصرف‌ترین بخش مربوط به خردایش به خصوص آسیاها هستند، آسیای نیمه‌خودشکن یکی از این دستگاه‌های عظیم بوده که نیاز به مصرف بالای انرژی الکتریکی دارد که تهیه آن و میزان هزینه حاصله بزرگ‌ترین معضل ایجاد شده در بخش فرآوری بوده است. در این پروژه بر روی پارامترهای که بر روی توان مصرفی آسیا نقش مستقیم دارند به عنوان ورودی مدل ایجاد شده با استفاده از شبکه‌های عصبی است، در این مدل از رابطه (۴-۱) برای محاسبه توان آسیا استفاده شده است که دلیل اصلی آن آسان بودن کد نویسی و پارامترهای کم آن است.

$$Pm = ۲۵.۹(W_E + W_L) - ۲۰۶۴.۵ \quad (۴-۱)$$

Pm: توان مصرفی آسیا به کیلو وات

W_E: وزن خالی آسیا به تن

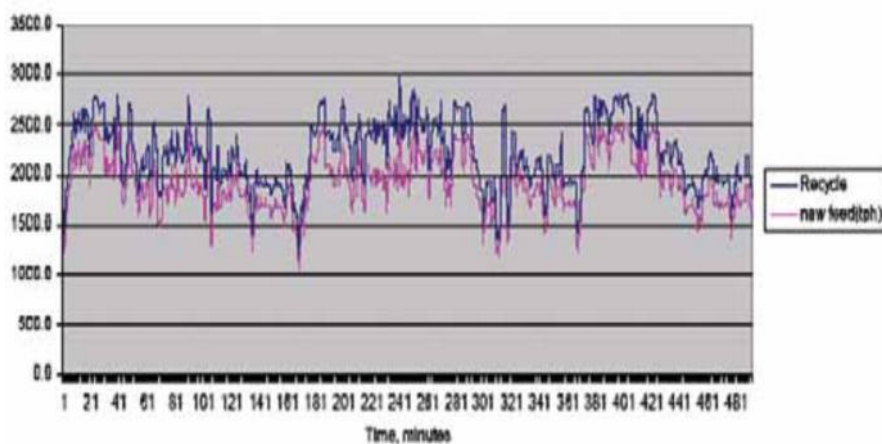
W_L: وزن با بار آسیا به تن

هدف از انجام این کار ایجاد یک مدل دینامیکی که حالت طبیعی داشته باشد و با گذر زمان و تغییر شرایط کاری مقادیر پیش بینی شده با نتیجه به دست آمده در کارخانه نزدیک باشد. در این مقاله از مدل شبکه عصبی برگشتی (RNN)^۲ استفاده شده چون اکثر پارامترها معمولاً رابطه‌ای غیر خطی با

^۱ Recycle

^۲ Recurrent Neural Network

هم دارند و در تعریف دوره تکرار تابع هدف این مدل بهتر است. شکل (۴-۵) مدل ایجاد شده با شبکه‌های عصبی برای پیش بینی توان را نشان می‌دهد (Kawatra, ۲۰۰۶).



شکل ۴-۵ مدل پیش بینی و واقعی آسیای نیمه‌خودشکن (Kawatra, ۲۰۰۶)

با بررسی شکل (۴-۵) نتایج پیش بینی شده برای مدل با سه ورودی (کاهش پارامتر) قابل قبول نیست، که می‌توان دلایل زیر را بیان نمود:

- فقدان کیفیت پارامترها و نبود سنسورهای دقیق در اندازه‌گیری
- رابطه متقابل بین ورودی‌ها مدل با فرضیات نامرتبط
- نداشتن تاثیر مستقیم بعضی از ورودی‌ها بر روی خروجی مدل
- ایجاد انحراف بعضی از ورودی‌ها بر روی خروجی مدل (Kawatra, ۲۰۰۶).

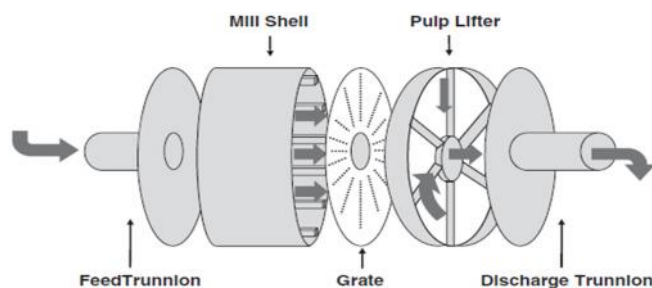
۴-۲-۵- شبیه‌سازی زمان تاخیر ابعاد ذرات ورودی آسیای نیمه‌خودشکن با

استفاده از شبکه‌های عصبی

ابعاد ذرات یکی از متغیرهای مهم در آسیای نیمه‌خودشکن در مرحله خردایش است. بنابراین سنجش کارایی متغیر یا حتی پیش بینی تغییرات آن در بخش خردایش مهم است. در این تحقیق به مدل‌سازی زمان تاخیر ابعاد ذرات خوراک ورودی آسیای نیمه‌خودشکن با استفاده از شبکه‌های عصبی

(TDNN)^۱ و کاربرد الگوریتم لونیبرگ مارگارت^۲ در طراحی شبکه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد پیش بینی نتایج حاصله از مدل متناسب با اطلاعات صنعتی و پارامترهای عملیاتی است. از این مدل می‌توان برای پیش بینی ابعاد ذرات مراحل آینده و هم چنین زمان کافی برای درست نگه داشتن چرخه در طول انجام کار با وجود پارامترهای عملیاتی ناهنجار (غیر عادی) استفاده کرد و یک مزیت خوب آن کنترل فرآیند صنعتی کارخانه به صورت هوشمند است. شکل (۴-۶) شمای آسیای نیمه‌خودشکن مورد نظر را نشان می‌دهد (Don ko and Shang, ۲۰۱۱).

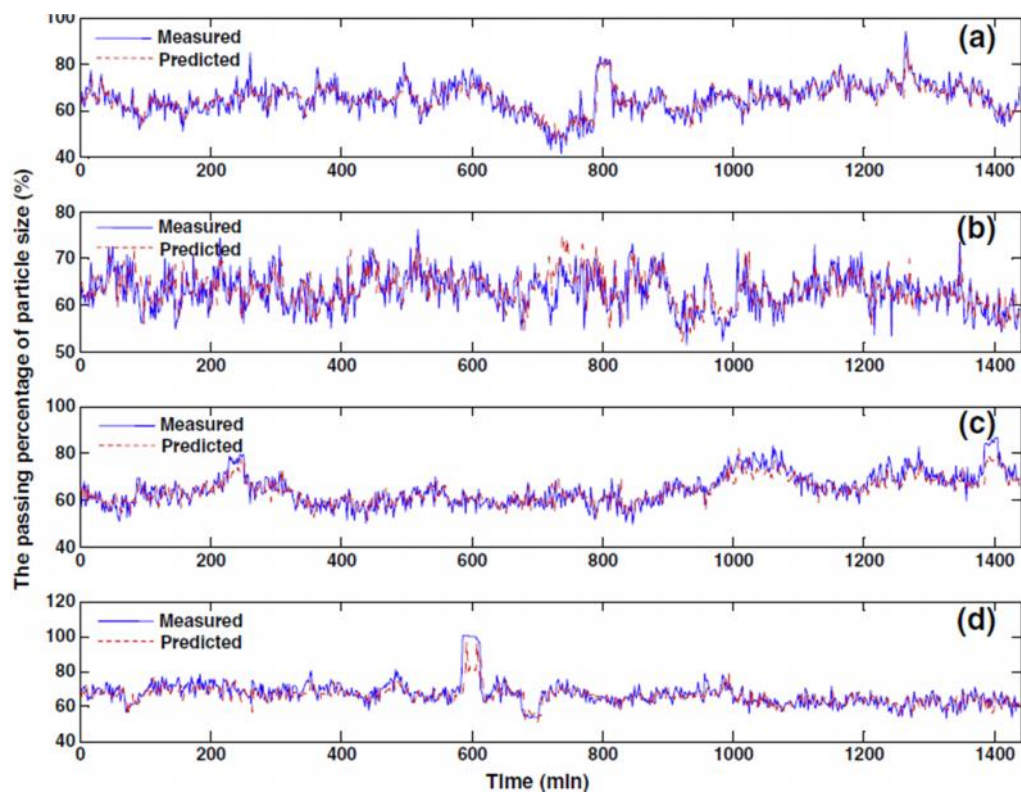
از شبکه‌های عصبی برای حل معادلات پیچیده، ترکیبات مبهم، غیر خطی و پیش بینی و بهبود بر وضعیت وضع حاکم بر مسئله استفاده می‌شود. خردایش یکی از بخش‌های اصلی کارخانه فرآوری است، که دستگاه آسیای نیمه‌خودشکن علاوه بر حساسیت کاری آن در بخش دوم خردایش بدلیل هزینه‌های بالای مصرف انرژی، تحقیقات وسیع بر روی پارامترهای موثر خود دستگاه و پارامترهای ورودی تاثیر گذار بر آن انجام شده است که هدف نهایی آن کاهش مصرف انرژی یا پیش بینی وضعیت کاری دستگاه با توجه به متغیرهای عملیاتی و ثابت که تاثیر بر راندمان دستگاه و میزان مصرف انرژی دارند (Don ko and Shang, ۲۰۱۱).



شکل ۴-۶- شمای یک آسیای نیمه‌خودشکن

^۱ Time delay neural network

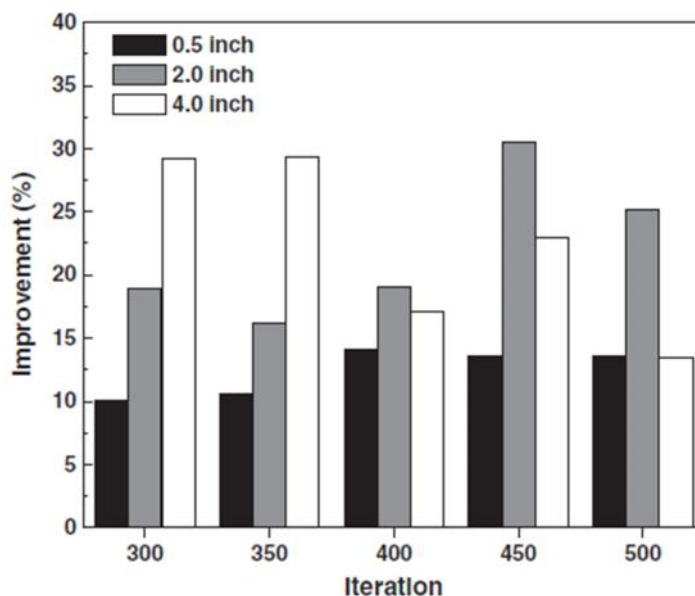
^۲ Levenberg Marquardt algorithm



شکل ۴-۷- نتایج حاصله از پیش بینی مدل ایجاد شده با مقادیر واقعی بر چهار مدل فرضی (Don ko and Shang, ۲۰۱۱).

از روش زمان تاخیر شبکه‌های عصبی برای پیش بینی ابعاد ذرات استفاده شد. در این مدل از یک رگرسیون غیر خطی خارجی (NARX)^۱ استفاده شد، برای اینکار پنج مدل جداگانه با دوره تکرار ۴۵۰، ۴۰۰، ۳۵۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ مرتبه استفاده شد. عملکرد مدل شبیه‌سازی شده در مقایسه با نتایج واقعی ثبت شده مشابه هم بوده به عبارتی راندمان کار رضایت بخش حاصل شد.

^۱ Nonlinear autoregressive exogenous



شکل ۴-۸- بهبود نتایج پیش بینی مدل شبیه سازی شده با استفاده از شبکه عصبی

با توجه به مقادیر واقعی (Don ko and Shang, ۲۰۱۱)

در شکل (۴-۸) بر روی ذراتی ابعاد ۰/۵ ، ۲ و ۲/۵ اینچ شبیه سازی انجام شد و نتایج حاصله برای دوره‌های تکرار متفاوت گوناگون بوده و نتایج با استفاده از روش‌های آماری اعتبارسنجی شده و مورد شبیه سازی شده با اطلاعات عملیاتی نتایج نزدیکی دارند (Don ko and Shang, ۲۰۱۱).

۴-۲-۶- دیگر کارهای انجام شده در زمینه آسیای نیمه‌خودشکن

در جدول زیر به تعدادی از مقالات که از سال ۲۰۰۲ به بعد در مورد آسیای نیمه‌خودشکن انجام شده را جمع آوری کرده و نتایج حاصل از آن بیان شده است.

جدول ۴-۲- کارهای انجام شده در مورد آسیاهای نیمه‌خودشکن

موضوع مقاله	نام نویسنده	سال انتشار	روش انجام کار	نتایج
کنترل قدرتمند آسیای نیمه‌خودشکن	Galan, et al	۲۰۰۲	طراحی و مدل سازی (مدل دینامیکی) با استفاده از نرم افزار متلب	کنترل توان مصرفی آسیا با در نظر گرفتن پارامترهای چون نرخ خوراک ورودی و خروجی و ابعاد ذرات و افزایش ظرفیت محصول تولید شده برای مرحله بعد

پیش بینی مطلوب توان مصرفی با در نظر گرفتن تابع توزیع شکست(نرخ شکست) و پیروی ابعاد محصول نهایی حاصله از شبیه سازی از مقدار انداز گیری شده در مقیاس صنعتی	مدل ریاضی، عملکرد تابع توزیع شکست	۲۰۰۳	Morrell	یک مدل جدید برای آسیای خودشکن و نیمه خودشکن برای طراحی و بهینه سازی
استفاده از یک آسیای آزمایشگاهی به قطر ۱/۸ متر و طول ۰/۶ متر، مقایسه نتایج آزمایشگاهی با آسیای صنعتی و میزان شکست درصد خردایش محصول حاصله برای مرحله بعد	روش عناصر گسسته (DEM)	۲۰۰۴	Morrison, Cleary	کاربرد روش DEM برای مدل سازی شکست خوراک در آسیای نیمه خودشکن در مقیاس آزمایشگاهی (پیلوت)
نتایج نشان می‌دهد که کارایی کلاسیفایر و بار در گردش در چرخه بسته بر روی استفاده مفید انرژی تاثیر مستقیم دارد	تحقیقات و آزمایشات آزمایشگاهی	۲۰۰۷	Morrell	یک مدل برای پیش بینی انرژی ویژه مورد نیاز در چرخه خردایش و ارزیابی بهره برداری مفید از انرژی
برای خردایش کانه از ابعاد ۳/۳۵ میلی‌متر به ابعاد ۱۵۰ میکرون میزان انرژی مصرفی برای آسیای گلوله‌ای ۴ مگاوات است در حالی که برای آسیای گردان ۲/۶ مگاوات است. معدن طلای کومتا در قرقیزستان	تحقیقات آزمایشگاهی براساس قانون باند	۲۰۰۸	Fengnian, et al	مقایسه مصرف انرژی بین آسیای گلوله‌ای با آسیاهای گردان
پیش بینی پارامترهای توان مصرفی، نرخ خوراک، درصد F۸۰ و وزن آسیا و اعتبارسنجی آن با نتایج اندازه گیری شده	مدل استنباطی، روش‌های آماری	۲۰۰۹	Apelt, Thornhill	اندازه گیری استنباطی برای پنج پارامتر آسیای نیمه خودشکن، مدل استنباطی
به ازای ۱ درصد افزایش در مقدار سطح باز، ۰/۴ درصد به مقدار بار در گردش آسیا افزوده می‌شود. در نهایت مدت زمان کارکرد مفید شبکه‌ها در داخل آسیا ۵۰۰۰ ساعت به دست آمد	مقادیر اندازه گیری شده در کارخانه	۲۰۰۹	عظیمی و همکاران	بررسی عمل کرد شبکه‌های تخلیه آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه
نتایج نشان می‌دهد افزایش سرعت، تعداد بالابر ها و بالابرها بزرگتر بر روی میزان برخورد و نرخ خردایش و	آزمایشات آزمایشگاهی	۲۰۱۰	Rezaeizadeh, et al	مشاهدات آزمایشگاهی پارامترهای بالابر و

عملکرد توان مصرفی آسیا و برخورد با لاینرها				عملکرد توان مصرفی آسیا و برخورد با لاینرها
عملکرد توان مصرفی آسیا و برخورد با لاینرها	شبه سازی و محاسبه جریان مواد داخل آسیا، سرعت و زاویه برخورد گلوله‌ها	۲۰۱۰	رزانی محقق	تحلیل دینامیکی برخورد گلوله به لاینر آسیای نیمه‌خودشکن
عملکرد توان مصرفی آسیا و برخورد با لاینرها	تبدیل AG به SAG	۲۰۱۱	Maleki, et al	تبدیل آسیای خودشکن مجتمع سنگ آهن گل گهر به آسیای نیمه‌خودشکن
عملکرد توان مصرفی آسیا و برخورد با لاینرها	بر اساس ترکیب برحورد بار با AMIRA P۹۰	۲۰۱۲	Bueno, et al	مدل ترکیبی چندگانه آسیای خودشکن با آسیای نیمه‌خودشکن
عملکرد توان مصرفی آسیا و برخورد با لاینرها	مدل سه بعدی و ترکیبی دو روش SPH-DEM با یک آسیای آزمایشگاهی با قطر ۱,۸ متر و طول ۰,۶ متر	۲۰۱۲	Cleary, Morrison	پیش بینی سه بعدی جریان مواد (پالپ) در داخل فضای آسیای نیمه‌خودشکن و بخش تخلیه در مقیاس آزمایشگاهی

۴-۳- جمع بندی

در این فصل به بررسی تحقیقات و کارهای انجام شده بر روی آسیای خودشکن به خصوص نیمه‌خودشکن پرداخته شد، اکثر مدل‌ها و کارهای انجام شده بر مبنای کارهای آزمایشگاهی یا شبیه سازی و مدل سازی عددی بود. به دلیل تنوع کانسارها و مشکلات حاصله از هزینه‌های حاصل از مصرف انرژی سعی بر این است تا در مراحل اولیه ایجاد کارخانه از یک آسیای نیمه‌خودشکن با ابعاد

مناسب را طراحی کرد و در مراحل بعدی به گونه‌ای از دستگاه استفاده کرد که کمترین تاخیر را در سیکل کاری دستگاه ایجاد شود.

نتایج حاصله از کارهای انجام شده نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌ها و مدل‌سازی‌های که به صورت دینامیکی (پویا) هستند نتایج رضایت بخش‌تری نسبت به کارهای دیگر دارد و چون بر اثر مرور زمان آسیا در حال تغییراتی براساس تغییرات پارامترهای ورودی و عملیاتی در گذر زمان حاصل می‌شود، مدل‌های دینامیکی پیش‌بینی سریع‌تر و نزدیک‌تری به نتایج واقعی اندازه‌گیری شده نسبت به روش‌های وقت‌گیر ریاضی و آزمایشگاهی دارند.

فصل پنجم:

ارزیابی مدل‌های مختلف توان آسیای نیمه‌خودشکن و انتخاب مدل‌های مناسب

۵-۱- مقدمه

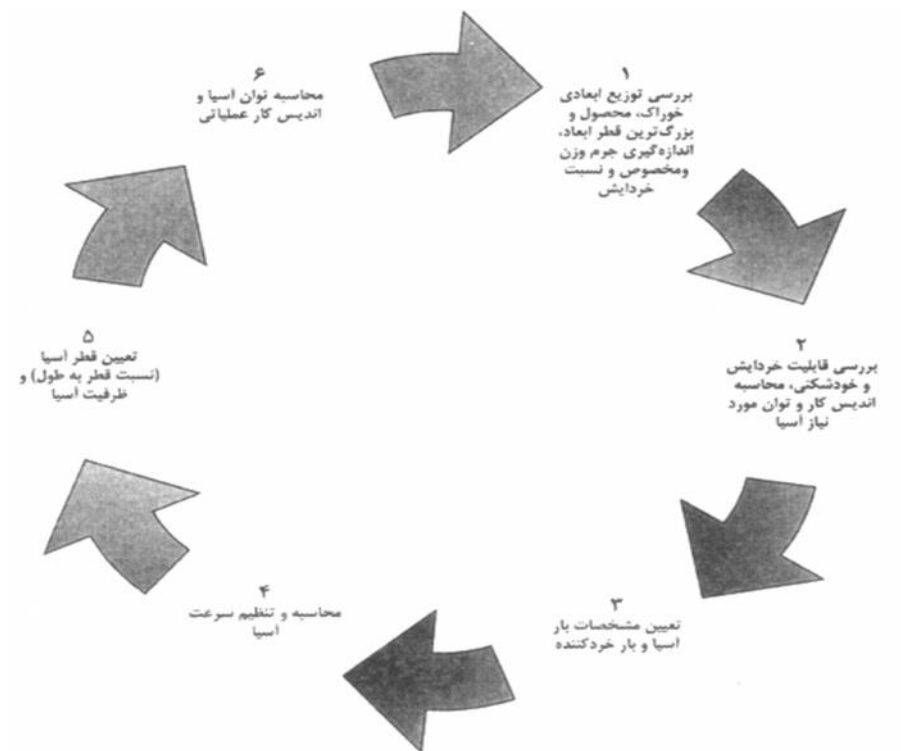
محاسبات مربوط به آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن شامل محاسبات عوامل طراحی - عملیاتی آسیا بدین شرح است: ظرفیت یا ابعاد آسیا، توان آسیا، سرعت دوران آسیا.

در طراحی فلوشیت‌های سنگ شکنی- آسیا کنی، برآورد صحیح توان آسیا، از آنجا که یکی از فاکتورهای تصمیم‌گیری در انتخاب بین آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن می‌باشد، بسیار مهم

است. در بسیاری موارد، مدار با کمترین مصرف انرژی بهترین گزینه است. توان مصرفی آسیا تابعی از قطر، طول و سرعت دوران آسیا است. اولین آسیاهای خودشکن در ایالات متحده و کانادا، دارای قطر بزرگ و طول کوچک بودند. آسیاهای خودشکن اولیه در سوئد و آفریقای جنوبی نسبت طول به قطر بسیار بزرگتری از آسیاهای موجود در ایالات متحده و کانادا داشتند. کارخانه بولیدن آیتیک^۱ در سوئد از آسیای اولیه به قطر ۲۰ فوت و طول ۳۴ فوت استفاده می‌کند. در برخی آسیاهای که اخیراً جهت نصب در ایالات متحده و کانادا خریداری شده‌اند، گرایش به افزایش نسبت طول به قطر مشاهده می‌شود. تجارب عملیاتی آسیاها به برخی از سوالات در رابطه با تاثیر نسبت طول به قطر در ابعاد محصولات آسیاها پاسخ خواهد داد (سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۱).

در شکل (۵-۱) روند انجام مراحل مختلف تعیین مقدار عوامل عملیاتی آسیاها ارائه شده است. در این شکل دو مرحله اول مربوط به تعیین مشخصات ماده معدنی (خوراک آسیا) است. توالی انجام مراحل در شکل زیر الزامی نیست و برخی مراحل به صورت رفت برگشت انجام می‌شود و برخی دیگر بسته به شرایط و نتایج آزمایش‌ها از بعضی مراحل صرف نظر می‌شود.

^۱ Boliden aitec



شکل ۵-۱- روند انجام محاسبات تعیین عوامل عملیاتی آسیاها (سازمان نظام مهندسی معدن، ۱۳۹۱)

۵-۲- عکس العمل آسیای نیمه خودشکن به ورود خوراک

ابتدا فرض می‌شود که در داخل آسیا گلوله‌ای نیست و فقط سنگ معدن وارد آن می‌شود. خوراک با نسبت سنگ معدن به دانه بندی ثابت وارد می‌شود.

۱- با ورود خوراک در اثر چرخش آسیا و وجود بالابر، سنگ به شانه بار برده شده و سپس رها می‌شود و روی پاشنه فرود می‌آید. توان کشی آسیا به دلیل کار انجام شده روی بار بلافاصله شروع به افزایش می‌کند. در ابتدا هیچ جریانی از مواد از آسیا خارج نمی‌شود. چون فضای مرده بین آخرین ردیف روزنه‌های شبکه و پایین آسیا باید پر شود. حجم مواد و توان کشی به طور پیوسته افزایش پیدا می‌کنند. چون آسیا از خوراک جدید پر شده، به دلیل گوشه دار بودن سنگ‌های درشت، این بخش‌ها به سرعت خرد می‌شود. محصول چنین خردایشی تکه‌های کنده شده از گوشه‌هاست که منجر به درشت شدن دانه بندی ذرات محصول آسیا می‌شود.

۲- با کنده شدن گوشه‌های سنگ‌های درشت، آن‌ها شبه کروی شده که این بخش به بازمانده^۱ معروف است. نرخ‌ی که با آن، بخش بازمانده توسط سایش خرد می‌شود، کمتر از خوراک جدید است. در نتیجه نرخ پر شدن آسیا شروع به شدت گرفتن می‌کند. با افزایش سهم سنگ‌های بازمانده در بار، نرخ افزایش جریان مواد خروجی از آسیا نیز کاهش می‌یابد. در حالی که اندازه ذرات محصول ممکن است ریزتر شود. در نتیجه حجم بار و توان کشی شروع به بالا رفتن می‌کنند.

۳- اگر چه سنگ‌های بازمانده با نرخ کمتری نسبت به خوراک جدید خرد می‌شوند اما نهایتاً به نقطه‌ای می‌رسد که در اثر ساییدگی سنگ‌های ورودی به ابعاد بین ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر می‌رسند. در این نقطه، بخشی از این ذرات توسط وارد شدن ضربه توسط سنگ‌های بزرگ‌تر خرد می‌شوند. کاهش اندازه این ذرات باعث می‌شود که از شبکه عبور کنند، حجم بار به همراه توان کشی افزایش پیدا می‌کند ولی با نرخ کمتر. در صورتی که اگر در اثر سختی سنگ در ابعاد بین ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر، با نرخ بالا خرد نشوند، شروع به تجمع در آسیا می‌کنند. که به مواد با ابعاد بحرانی معروف اند و با اشغال حجم آسیا ظرفیت آن را محدود می‌کنند.

۴- در حالی که بار سنگی درشت ساییده می‌شده و به تعادل می‌رسیده، دانه بندی و مقدار ذرات ریزتر در آسیا به دلیل تغییر شرایط خردایش سنگ‌های بزرگ‌تر در حال تغییر بوده است. این ذرات به همراه آب خوراک، فضای بین بار سنگی درشت را اشغال می‌کنند. بخشی از این ذرات به دلیل سایش، بیشتر خرد شده و بخشی دیگر از فضای بین ذرات عبور کرده و بدون خردایش بیشتر، با گذشت از شبکه، بیرون می‌روند.

۵- نهایتاً لحظه‌ای می‌رسد که مقدار سنگ‌های درشت و توزیع دانه بندی آن‌ها شروع به پایدار شدن می‌کند. در این لحظه، اکثر سنگ‌ها بازمانده بوده و شبه کروی می‌باشند. نرخ شکست سنگ‌های درشت، به ابعاد کوچکتر، با نرخ سنگ‌های درشت ورودی برابری می‌کند. در این حالت، پالپ به

^۱ Survivors

سطحی رسیده که فشار کافی را جهت خروج مواد از آسیا، فراهم می‌کند که برابر با میزان ورودی به آسیاست.

۶- حجم بار در آسیا دیگر افزایش پیدا نمی‌کند و شروع به نوسان با دامنه کاهنده می‌کند تا سیستم به حالت پایداری کامل برسد. توان‌کشی آسیا نیز همین روند را دنبال می‌کند.

۷- هر تغییری در نرخ و توزیع دانه بندی و سختی خوراک ورودی، عملیات را از حالت پایدار خارج می‌کند. دو عامل آخر در عملیات نقش حیاتی دارند (Kawatra, ۲۰۰۶)

۵-۳- بررسی معادلات ارایه شده برای محاسبه توان آسیای نیمه خودشکن

با توجه به معادلات بیان شده که بعضی براساس نتایج آزمایشگاهی و برخی براساس تجارب صنعتی به دست آمده است که برای استفاده از معادله مناسب که با داده‌های واقعی صدق کرده و در بخش بعدی برای کد نویسی مطلوب باشد به بررسی نتایج حاصل از معادلات پرداخته شده است. معادلات با ترتیب شماره در نرم افزار متلب کد نویسی شده و نتایج آن با داده‌های واقعی مورد مقایسه قرار گرفت. از مشکلات موجود در این بخش متغیرهای ورودی هست، که بعضی از این متغیرها در معادلات محاسبه توان تاثیر دارند و بعضی بدون تاثیر هستند که در بهینه سازی مسئله ابهام ایجاد می‌کند به عبارتی این که برخی پارامترها مستقیم بر روی دستگاه تاثیر دارند که در معادله مورد نظر نقشی ندارند ولی بعضی به صورت غیر مستقیم بر روی توان دستگاه تاثیر دارند که در انتخاب معادله مناسب برای محاسبه و پیش بینی توان بهینه دستگاه و مقایسه آن با مقادیر واقعی توان حائز اهمیت هستند به همین دلیل مقادیر واقعی توان با معادلات موجود مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان معادله نزدیک‌تر به جواب واقعی (حالت بهینه) را به دست آورد. اولین معادله، معادله آستین است که براساس قانون باند بیان شده (معادله ۲-۱۲) است، معادله دوم توان نرمال شده آسیا (نسبی)، (معادله ۲-۱۳) است (بدون در نظر گرفتن ابعاد دستگاه)، معادله سوم، معادله مک‌فرسون و ترنر است که برای

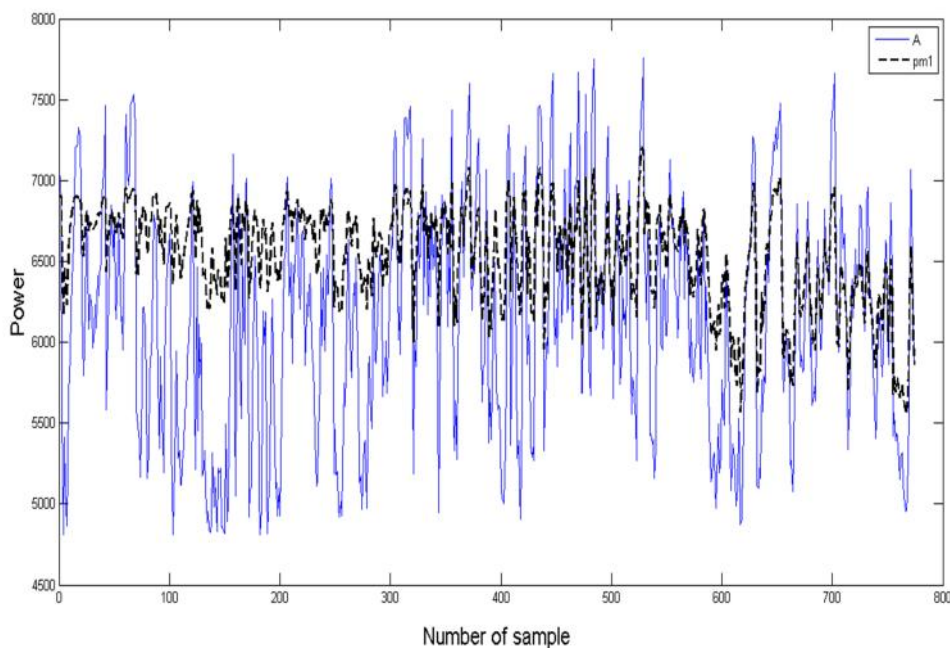
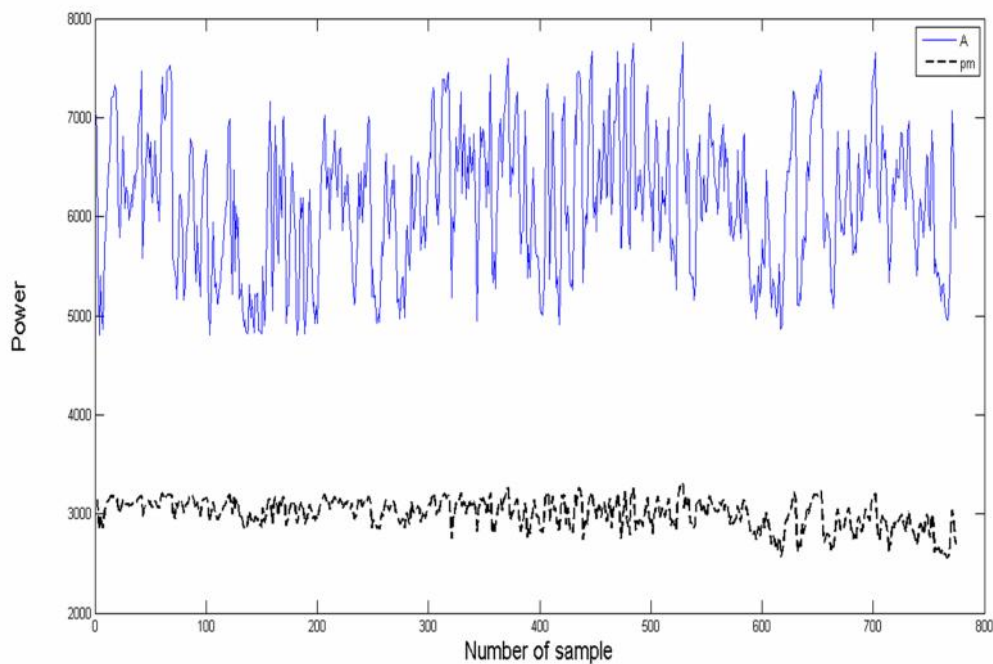
محاسبه توان آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن تجاری (معادله ۲-۶)) استفاده می‌شود، معادله چهارم نیز یک فرمول تجربی است (معادله ۲-۱) که براساس داده مقدار واقعی توان کار می‌کند، معادله پنجم، معادله مورل است (مجموع مقدار معادله ۲-۱۴) و (۲-۱۵) که براساس توان خالص بیان شده است، معادله ششم یک معادله تئوریک بوده که در جدول زیر آورده شده است، معادله هفتم هم یک مدل تجربی است که توسط آستین بیان شده است و آخرین فرمول توسط سالازار بیان شده که تعمیمی از معادله آستین است. در جدول زیر معادلات به همراه مقادیر بیشینه و کمینه محاسبه شده نسبت به داده‌های واقعی نشان داده شده است. مقادیر توان بر حسب کیلو وات است.

جدول ۵-۱- مقایسه مقادیر واقعی با نتایج پیش بینی با معادلات مدل شده برای محاسبه توان دستگاه

شماره	نویسنده	معادله	مقدار پیشینه	مقدار کمینه
A	-	داده‌های واقعی	۷۷۵۴	۴۸۰۹
PM	آستین	$\frac{P_m}{EM} = 1.03 \frac{D^{0.5} L}{J_C} \left[\left(1 - \rho_c \left(\frac{\rho_R}{M_R} \right) J_C + 0.6 J_B (\rho_b - \frac{\rho_R}{M_R}) \right) \varphi_c \left[1 - \frac{0.1}{\sqrt{1 - 0.1 \varphi_c}} \right] \right]$	۳۳۱۵	۲۵۵۷
PM ^۱	توان نرمال شده نسبی	$\frac{P_m}{EM} = \left(1 - 1.03 \frac{\rho_R}{J_C} \left(\frac{\rho_R}{M_R} \right) J_C + 0.6 J_B \left(\rho_b - \frac{\rho_R}{M_R} \right) \right) \varphi_c \left[1 - \frac{0.1}{\sqrt{1 - 0.1 \varphi_c}} \right]$	۷۲۰۶	۵۵۵۹
PM ^۲	مکفرسون و ترنر ^۱	$\frac{P_m}{EM} = 0.9 \frac{D^{0.5} L}{LD^{0.5} \rho_c} \left(\frac{\rho_R}{M_R} \right) \varphi_c \left[1 - \frac{0.1}{\sqrt{1 - 0.1 \varphi_c}} \right]$	۱۰۹۳۷	۷۰۴۶
PM ^۳	تجربی	$P_m = 0.9 \frac{D^{0.5} L}{LD^{0.5} \rho_c} \left(\frac{\rho_R}{M_R} \right) \varphi_c \left[1 - \frac{0.1}{\sqrt{1 - 0.1 \varphi_c}} \right]$	۷۷۲	۴۷۱
PM ^۴	مورل	توان خالص	۵۳۱	۴۰۲
PM ^۷	تجربی	$P_m = K \frac{D^{0.5} L}{LD^{0.5} \rho_c} \left(\frac{\rho_R}{M_R} \right) \varphi_c \left[1 - \frac{0.1}{\sqrt{1 - 0.1 \varphi_c}} \right]$	۱۰۴۴۹	۳۵۱۵
PM ^۸	سالازار	$\frac{P_m}{EM} = \frac{K D^{0.5} L}{k D^{0.5} J_C} \left(1 - A J_C \right) \left(\frac{L}{D} \right) \varphi_c \left(1 - \frac{0.1}{\sqrt{1 - 0.1 \varphi_c}} \right) \rho_c$	۱۲۲۰	۲۷۶

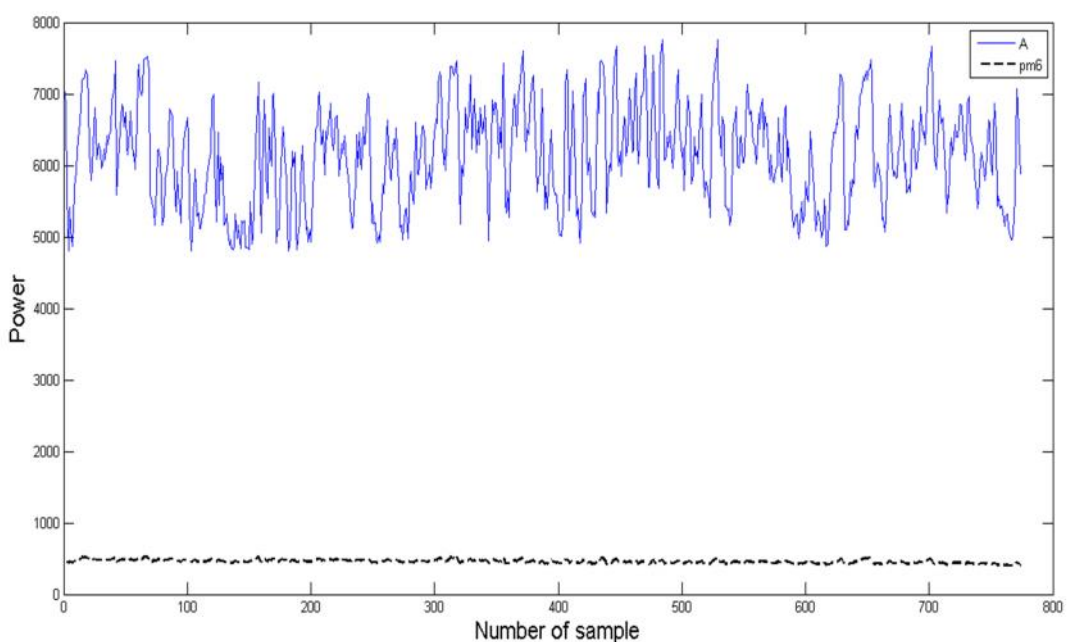
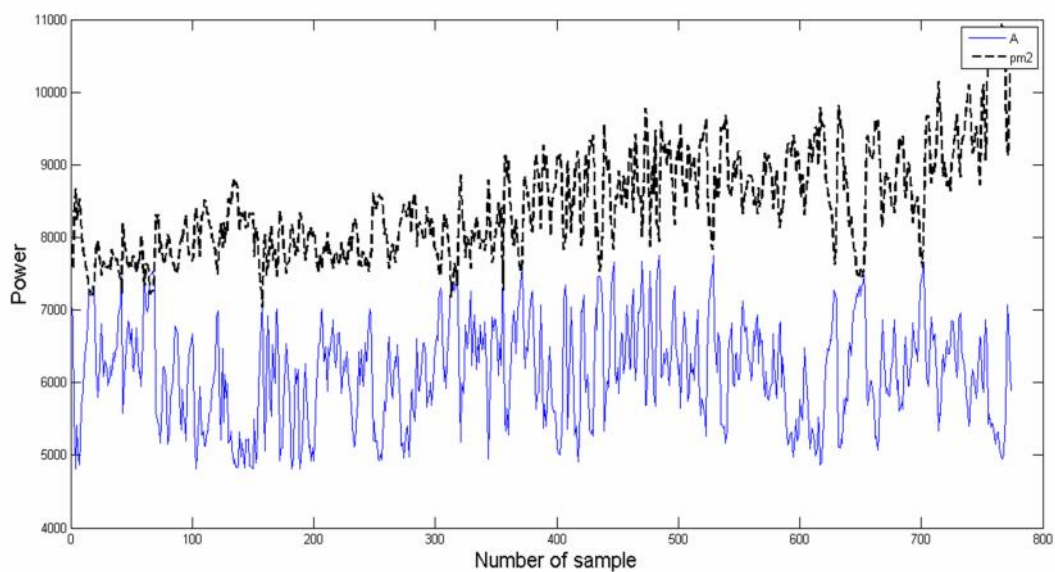
^۱ MacPherson and Turner

در شکل (۲-۵) بالا مربوط به معادله PM که توسط آستین بیان شد با داده‌های واقعی هیچ نزدیکی ندارد به طوری که در شکل (۲-۵) پایین که مربوط به معادله PM_۱ که توسط نیل و ادوارد ارایه شد با داده‌های واقعی نزدیکی مناسبی دارد و به طور تقریبی شرایط کاری دستگاه را پیش بینی می‌کند.



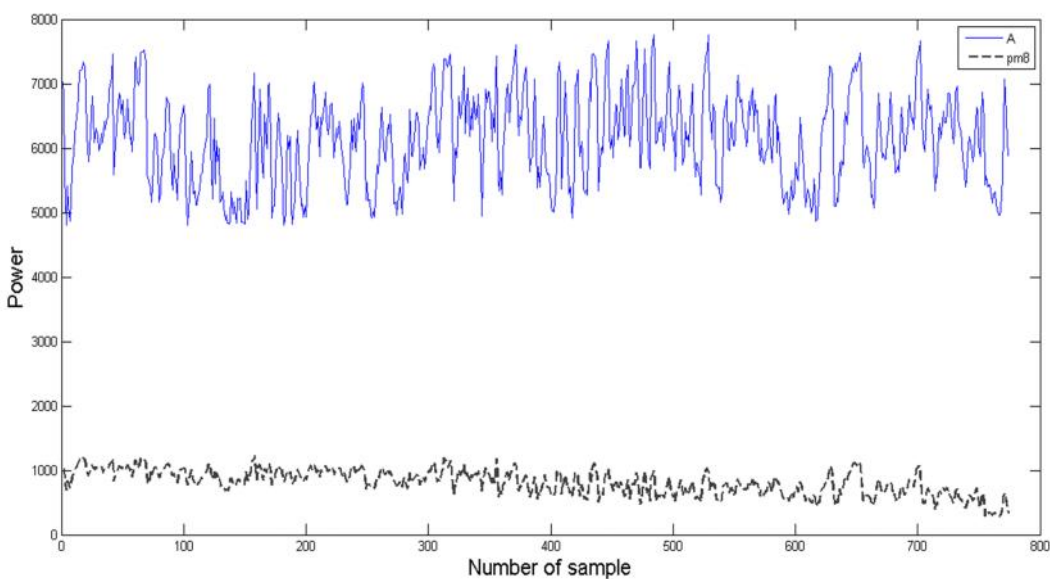
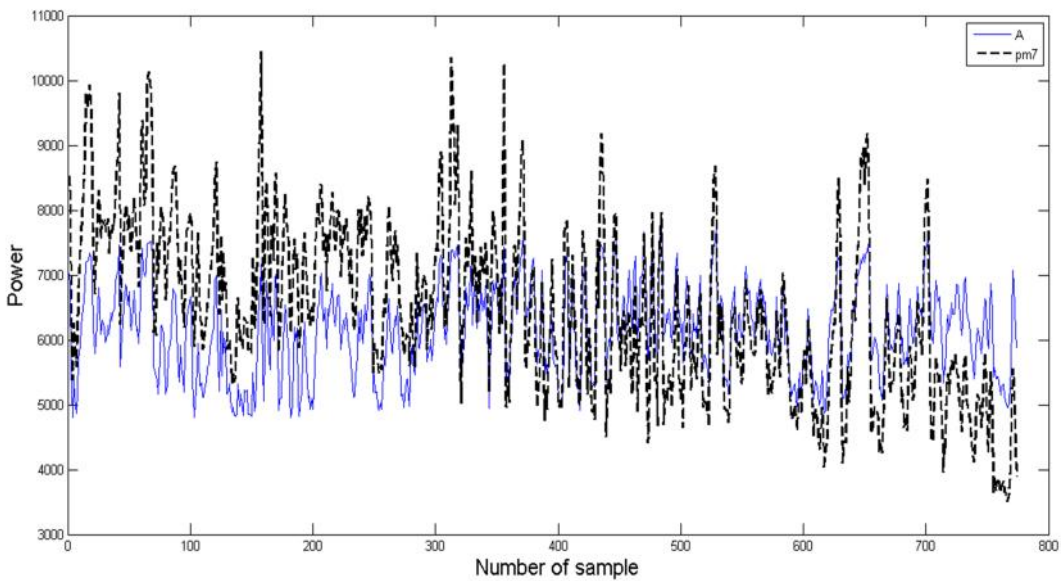
شکل ۲-۵- نتایج حاصله از پیش بینی مدل ایجاد شده با مقادیر واقعی (بالا: معادله pm و پایین معادله pm_۱)

در شکل (۳-۵) بالا مربوط به معادله PM_2 که توسط مک پرسون و ترنر بیان شد که مقدار پیش بینی شده خیلی بیشتر از داده‌های واقعی بود و شکل (۳-۵) پایین که مربوط به معادله PM_6 که یک معادله تجربی برای محاسبه توان آسیاهای نیمه خودشکن صنعتی است که توسط مورل ارایه شد، شکل (۳-۵) پایین نشان می‌دهد که مقدار پیش بینی شده بسیار کمتر از داده‌های واقعی است و هیچ تطبیقی با آن ندارد.



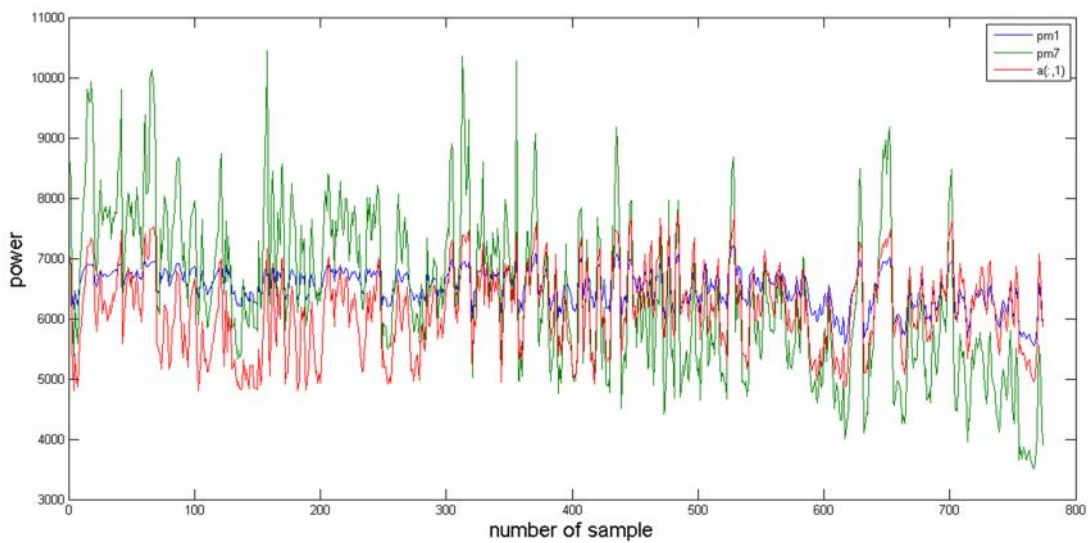
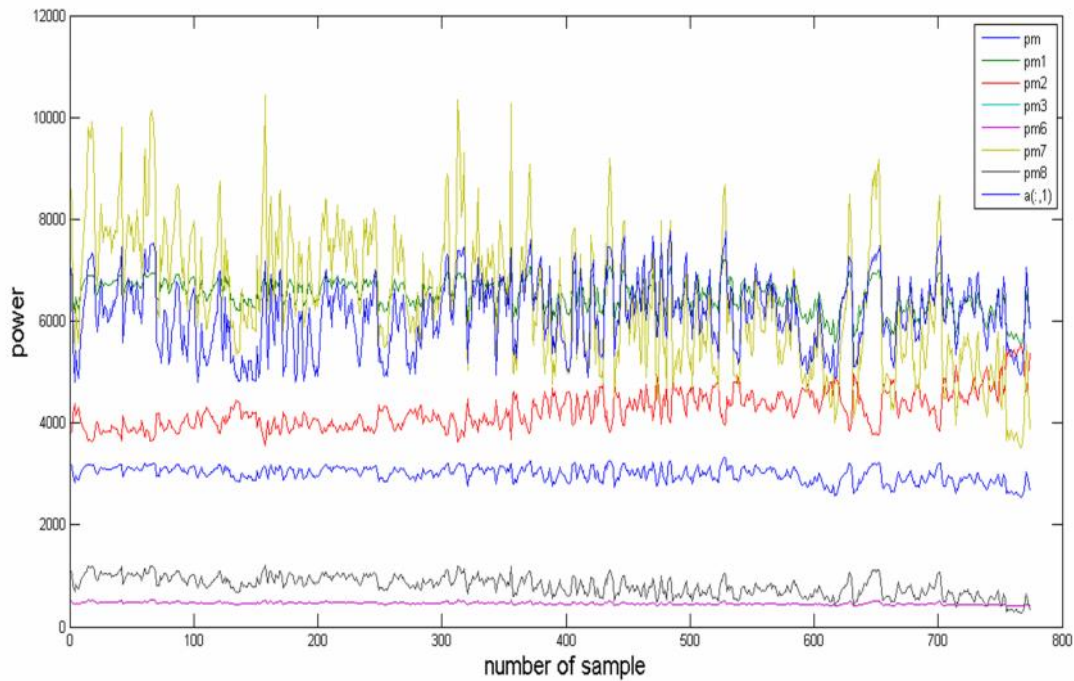
شکل ۳-۵- نتایج حاصله از پیش بینی مدل ایجاد شده با مقادیر واقعی (بالا: معادله pm^2 و پایین معادله pm^6)

شکل (۴-۵) بالا مربوط به معادله PMV که یک معادله تجربی است که مقدار پیش بینی شده خیلی نزدیک به داده‌های واقعی که در کارخانه ثبت شده است دارد و شکل (۴-۵) پایین که مربوط به معادله $PM8$ که حالتی از معادله آستین است که توسط سالازار ارایه شد، شکل (۴-۵) پایین نشان می‌دهد که مقدار پیش بینی شده بسیار کمتر از داده‌های واقعی است.



شکل ۴-۵- نتایج حاصله از پیش بینی مدل ایجاد شده با مقادیر واقعی (بالا: معادله pm^7 و پایین معادله pm^8)

در شکل (۵-۵) بالا مربوط به تمام معادلاتی است که به ترتیب در جدول (۵-۱) آمده است و شکل (۵-۵) پایین که مربوط به معادله PM_1 و PM_7 است که به دلیل نزدیکی نتایج آن‌ها با داده‌های واقعی که در کارخانه ثبت شده است و به طور مناسبی شرایط کاری دستگاه را پیش بینی می‌کند.



شکل ۵-۵- نتایج حاصله از پیش بینی مدل ایجاد شده با مقادیر واقعی (بالا: کل معادلات و پایین معادله PM_1)

(pm

با توجه به نمودارهای بالا می‌توان به این نتیجه رسید که نزدیک‌ترین مقادیر پیش بینی برای معادلات PM_{10} و $PM_{2.5}$ است که از این معادلات برای مدل سازی و تعریف تابع هدف و تابع هزینه استفاده خواهد شد. متغیرهای ورودی شامل درصد پرشدگی، درصد شارژ گلوله، چگالی شارژ توده آسیا، درصد پالپ، جرم گلوله، درصد جامد و بار در گردش آسیا هستند، که در مدل سازی نقش دارند. که میزان حساسیت آن‌ها نسبت به توان مصرفی آسیا با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

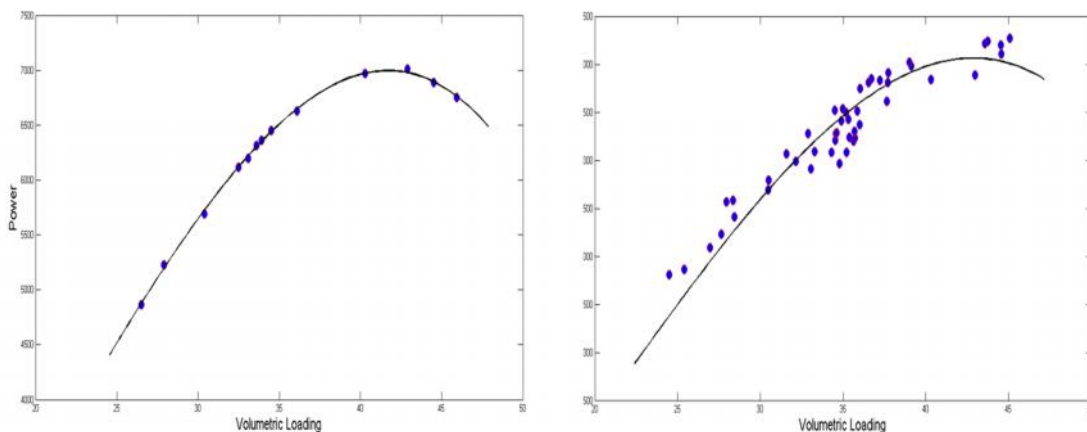
۵-۴- تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی الگوریتم ازدحام ذرات

در این مرحله حساسیت هر یک از پارامترها بر روی توان مصرفی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا به رفتار سنجی هر پارامتر، تعیین محدوده کاری و رابطه هر پارامتر با توان و دیگر پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا یک مدل اولیه برای تعیین بازه کاری دستگاه و بررسی تغییرات هر پارامتر بر روی توان مصرفی ایجاد شده است. هدف از ایجاد مدل اولیه این است که شرایط کاری دستگاه در حالت ایده آل با یک سیکل کاری معلوم شود و چون داده‌های واقعی گسسته هستند و الگوریتم مورد نظر برای داده‌های پیوسته کاربرد دارد به همین دلیل ایجاد مدل اولیه الزامی خواهد بود، بعد از ایجاد مدل اولیه آن را برای شرایط کاری واقعی دستگاه تعمیم خواهیم داد. برای ایجاد مدل اولیه از دو مدل PM_{10} و $PM_{2.5}$ که با داده‌های واقعی نزدیکی بیشتری دارند استفاده شده است. بهترین منحنی یا خط که با داده‌های واقعی و مقادیر پیش بینی شده مطابقت دارد توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات برازش شد. هم چنین میزان حداقل خطای حاصل از این تحلیل‌ها هم محاسبه شده است.

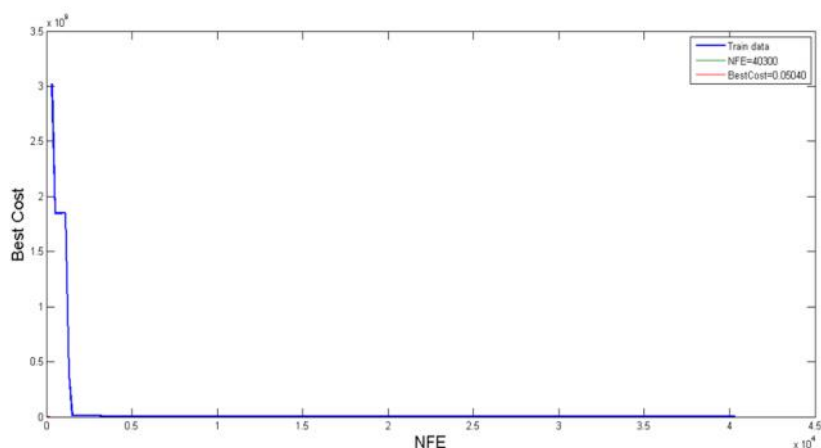
اولین پارامتر درصد پرشدگی (بخشی از حجم آسیا که توسط کانسنگ و گلوله پر شده) است، با توجه به شکل (۵-۶) تغییرات توان به ازای بار ورودی ابتدا سیر صعودی داشته که وقتی به نقطه اوج^۱

^۱ Peak

می‌رسد تغییر جهت داده و نزولی می‌شود به عبارتی با عبور از نقطه اوج با افزایش بار ورودی توان دستگاه کاهش می‌یابد، در این حالت دستگاه از مدار خارج شده و ممکن است به چرخ دنده‌ها و یاتاقان‌های هیدرودینامیک صدمه وارد کند، به همین دلیل کنترل دستگاه برای جلوگیری از عبور از نقطه اوج یکی از محدودیت‌ها و مشکلات جدی در این بازه کاری است که باید شدیداً کنترل شود. بهترین بازه کاری دستگاه بین ۳۵ تا ۳۸/۵ درصد بوده که کنترل این پارامتر در این بازه یکی از محدودیت‌های کاری دستگاه بوده که رابطه مستقیم بر روی توان مصرفی دستگاه دارد. چون با کنترل این پارامتر مستقیم بر روی مکانیزم خردایش، نقش واسطه سنگی، میزان مصرف گلوله (درصد شارژ گلوله) و ابعاد محصول مد نظر مرحله جدایش می‌توان تغییرات توان مصرفی و شرایط کاری و عملیاتی دستگاه را پیش بینی کرد. با افزایش درصد پرشدگی زمان خردایش برای تمام ذرات که به ابعاد مورد نظر برسند کاهش یافته و ابعاد محصول درشت خواهد بود و با کاهش درصد پرشدگی ذرات بیش از حد مورد نظر خرد شده باعث افزایش تولید نرمه می‌شود که در بخش جدایش یکی از معضلات است.. شکل (۵-۷) میزان خطای حاصل از برازش شکل (۵-۶) را نشان می‌دهد.

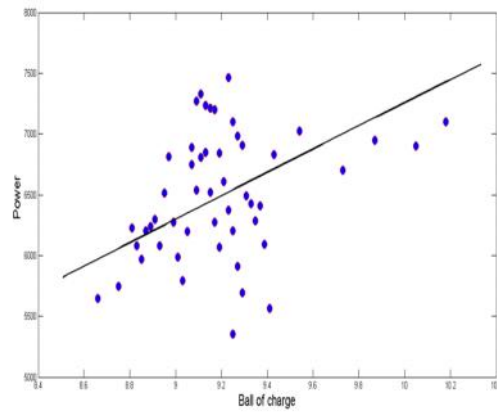
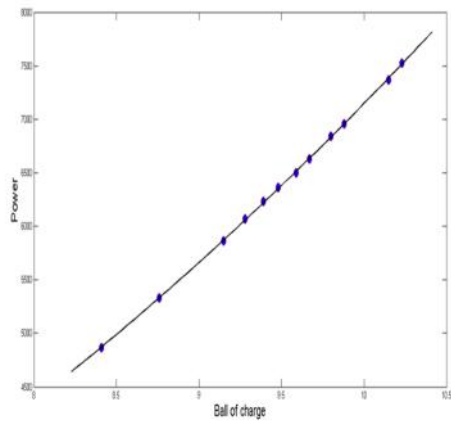


۵-۶- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر درصد پرشدگی آسیا(راست: مدل اصلی و چپ: مدل اولیه)

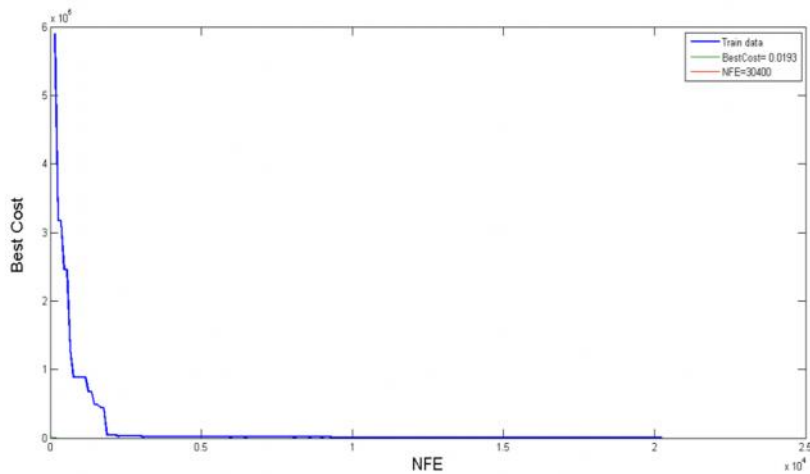


۵-۷- نمودار تخمین خطا برای پارامتر درصد پرشدگی آسیا

پارامتر بعدی درصد شارژ گلوله است که کنترل این پارامتر یکی دیگر از محدودیت‌های موجود در این بخش است. ابعاد گلوله‌های فولادی و تعداد آن‌ها به سختی کانسنگ، ابعاد کانسنگ و توزیع ابعادی آن بستگی دارد. با توجه به شکل (۵-۸) رابطه مستقیمی بین افزایش درصد شارژ گلوله با توان مصرفی آسیا وجود دارد که افزایش سیر صعودی معمولاً با افزایش سختی کانسنگ یا فقدان نبود ابعاد دانه درشت از حد معمول است و معمولاً برای کانسنگ نرم درصد شارژ گلوله و توان مصرفی کاهش می‌یابد. بهترین بازه کاری دستگاه بین ۹ تا ۹/۴ درصد شارژ گلوله است که در این بازه میزان توان مصرفی هم مقدار مناسبی به ازای بار ورودی خواهد بود. درصد شارژ گلوله هم یک عامل محدودکننده و مهم در این مدل سازی خواهد بود که کنترل و پیش‌بینی آن بر روی توان مصرفی حایز اهمیت است. افزایش ابعاد گلوله باعث کاهش تعداد آن، افزایش انرژی سنتیک خردایش و کاهش تناوب ضربات می‌شود که بر قراری ارتباط بین تعداد گلوله با ابعاد گلوله از دیگر پارامترهای مهم است که رابطه مستقیم بر مکانیزم خردایش دارد. البته با توجه به شرایط کاری آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه ابعاد گلوله و جرم گلوله تقریباً ثابت در نظر گرفته شده است. شکل (۵-۹) میزان خطای حاصل از برازش شکل (۵-۸) را نشان می‌دهد.

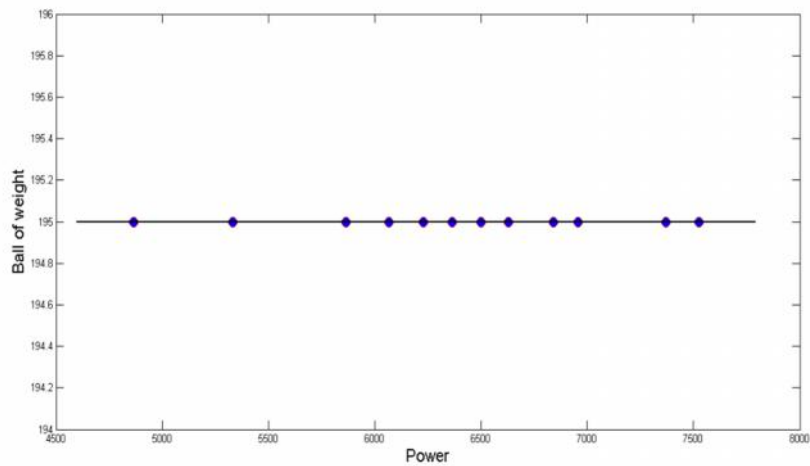


۵-۸- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر درصد شارژ گلوله آسیا (راست: مدل اصلی و چپ: مدل اولیه)

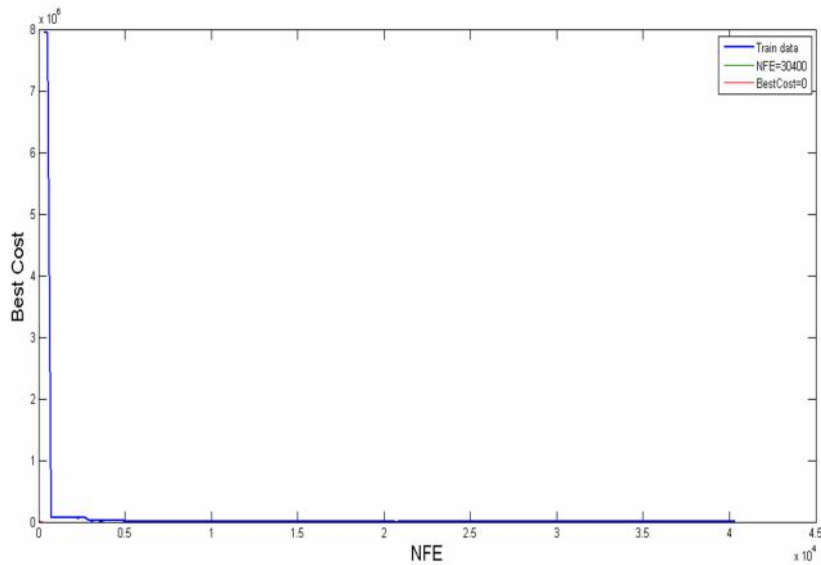


۵-۹- نمودار تخمین خطا برای پارامتر درصد شارژ گلوله آسیا

با توجه به این که پارامتر جرم گلوله خود یکی از پارامترهای تاثیر گذار است ولی به دلیل این که در کارخانه فرآوری مجتمع مس سرچشمه ثابت در نظر گرفته شده در مدل ایجاد شده هم ثابت در نظر می‌گیریم. شکل‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) به ترتیب تغییرات جرم گلوله نسبت به توان و میزان خطای برازش انجام شده را نشان می‌دهد.

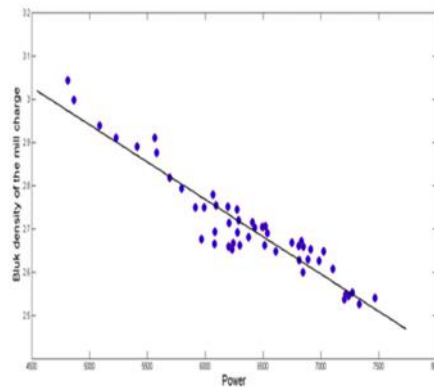
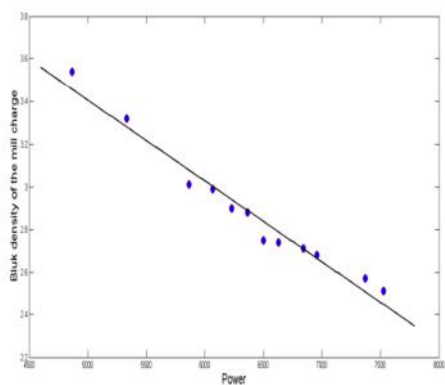


۵-۱۰- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر جرم گلوله آسیا

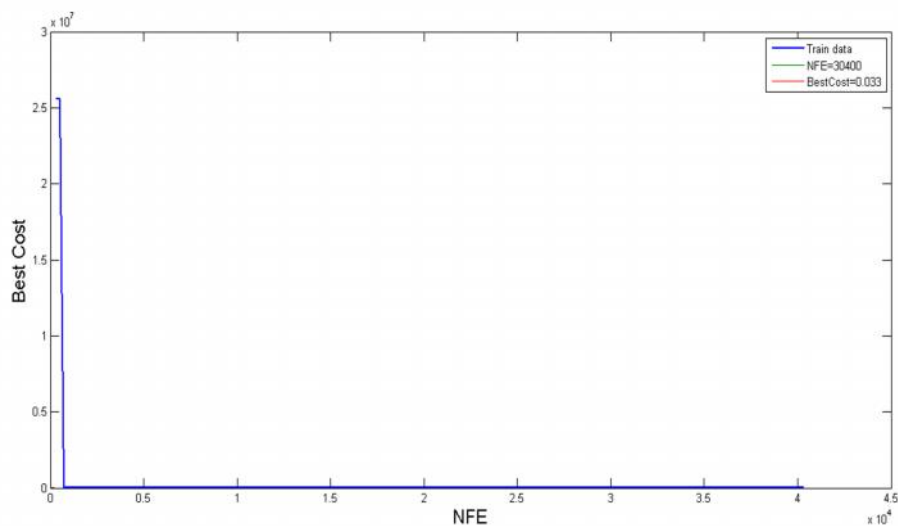


۵-۱۱- نمودار تخمین خطا برای پارامتر جرم گلوله آسیا

پارامتر دیگر چگالی شارژ توده آسیا است که رابطه غیر مستقیم با توان دارد که با کاهش چگالی شارژ آسیا مقدار توان افزایش یافته و با افزایش آن توان کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۵-۱۲) بهترین بازه کاری دستگاه زمانی است که چگالی شارژ توده آسیا بین ۲/۵۵ تا ۲/۷۵ است. برای محاسبه مقدار چگالی شارژ توده آسیا از رابطه (۲-۱۱) استفاده شده که توسط آستین ارایه شده است و ضرایب ثابت این رابطه همان مقادیری است که توسط آستین ارایه شده است (Austin, ۱۹۹۰).

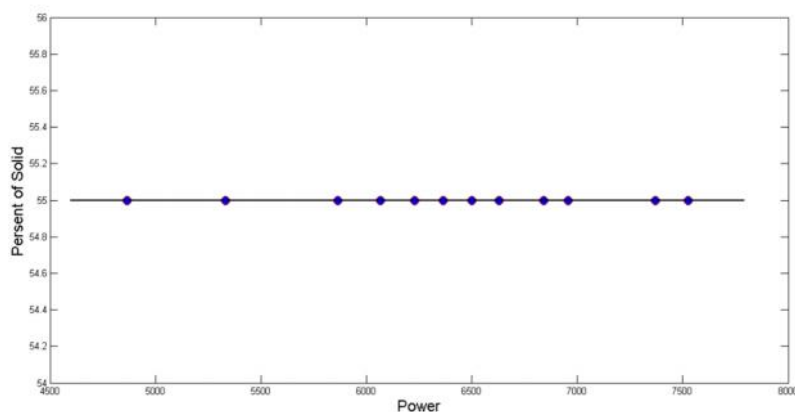


۵- ۱۲- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر چگالی شارژ توده آسیا (راست: مدل اصلی و چپ: مدل اولیه)

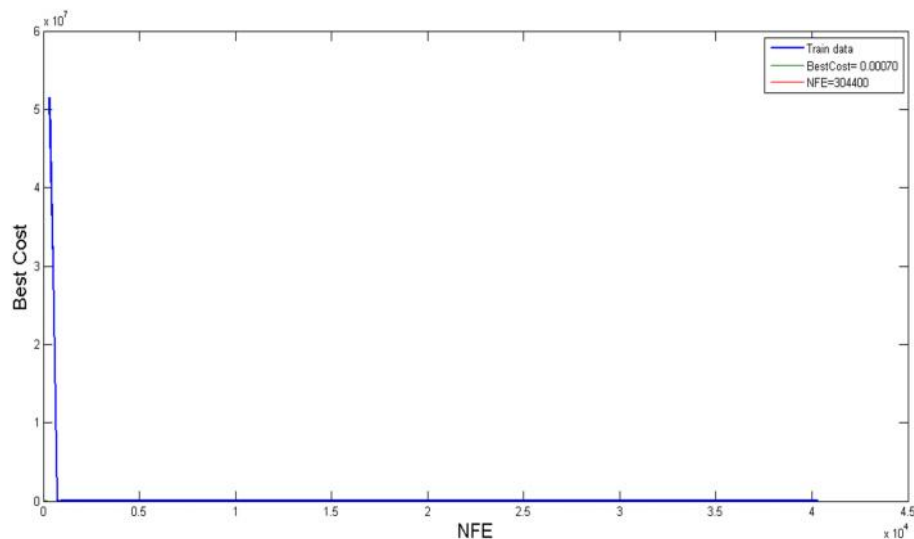


۵- ۱۳- نمودار تخمین خطا برای پارامتر چگالی شارژ توده آسیا

با توجه به این که پارامتر درصد جامد خود یکی از پارامترهای تاثیر گذار است ولی به دلیل این که در کارخانه فرآوری مجتمع مس سرچشمه ثابت در نظر گرفته شده در مدل ایجاد شده هم ثابت در نظر می گیریم. شکل (۵-۱۴) تغییرات درصد جامد نسبت به توان و شکل (۵-۱۵) میزان خطای برازش انجام شده است.



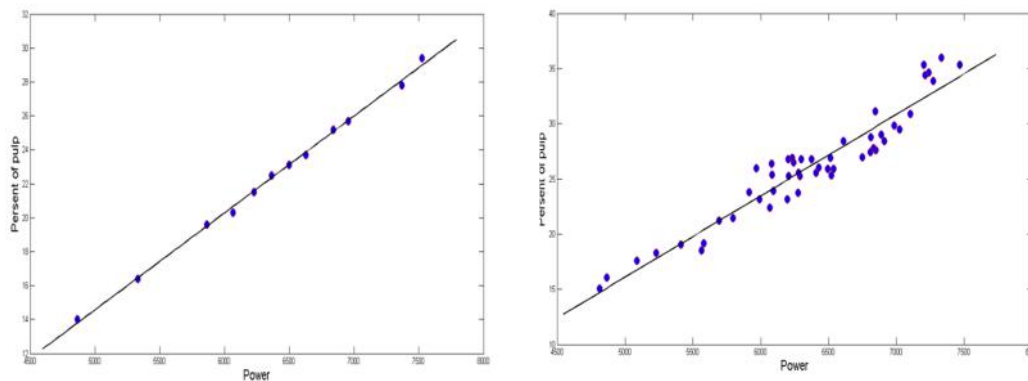
۵-۱۴- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر درصد جامد آسیا



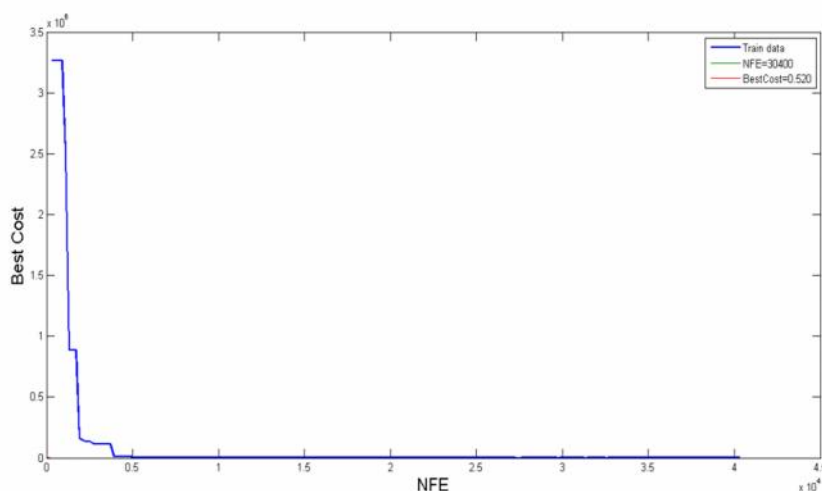
۵-۱۵- نمودار تخمین خطا برای پارامتر درصد جامد آسیا

پارامتر بعدی درصد پالپ (میزان غلظت پالپ) است که رابطه مستقیم با توان مصرفی دارد، به همین دلیل کنترل این پارامتر هم مهم است. به عبارتی درصد پالپ (بخشی از حجم آسیا که توسط کانسنگ و آب پر شده) است که شدیداً بر روی مکانیزم خردایش که در آسیای نیمه خودشکن سایشی-ضربه‌ای است تاثیر مستقیم دارد به عبارتی افزایش درصد پالپ مانند ضربه گیر عمل کرده و نیروی اصطکاک را کم می‌کند و حالت خردایش بیشتر ضربه‌ای خواهد بود، ولی با کاهش درصد پالپ سایش ایجاد شده باعث توسعه نیروی اصطکاک حاصل بین گلوله و ذرات درون آسیا می‌شود و حالت

خردایش بیشتر سایشی خواهد بود. با توجه به شکل (۵-۱۶) بهترین بازه کاری درصد پالپ متناسب با توان مصرفی ۲۳ تا ۲۸ درصد است.

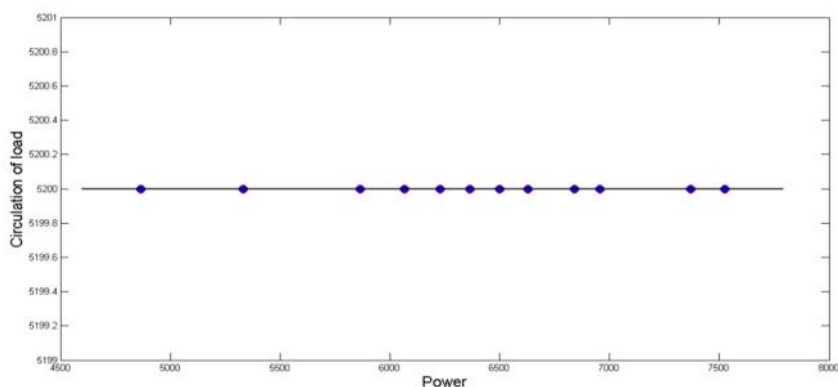


۵-۱۶- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر درصد پالپ آسیا(راست: مدل اصلی و چپ: مدل اولیه)

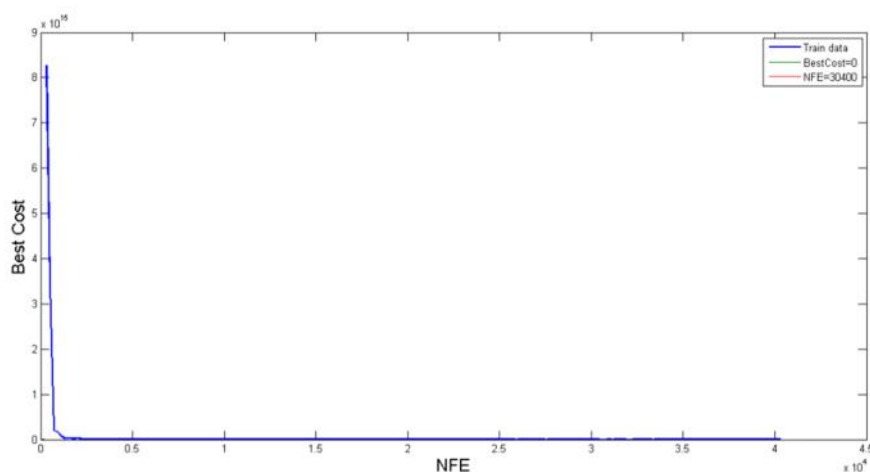


۵-۱۷- نمودار تخمین خطا برای پارامتر درصد پالپ آسیا

با توجه به این که پارامتر بار در گردش خود یکی از پارامترهای تاثیر گذار است ولی به دلیل این که تغییرات آن بر روی توان مصرفی کم است، این پارامتر را در مدل ایجاد شده ثابت در نظر می گیریم. شکل (۵-۱۸) تغییرات بار در گردش نسبت به توان و شکل (۵-۱۵) میزان خطای برازش انجام شده است.



۵- ۱۸- نمودار تحلیل حساسیت برای پارامتر بار در گردش



۵- ۱۹- نمودار تخمین خطا برای پارامتر بار در گردش

با توجه به نتایج تحلیل حساسیت با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات معلوم شد که پارامترهای درصد جامد، بار در گردش و جرم گلوله‌ها به دلیل ثابت بودن در طی عملیات تاثیر چندانی بر روی سیستم ندارند و باید از ورودی سیستم حذف شوند. با این شرایط پارامترهای ورودی سیستم عبارتند از: درصد پر شدگی، درصد شارژ گلوله، درصد پالپ و چگالی شارژ توده آسیا. خروجی سیستم هم توان مصرفی آسیا می‌باشد. در جدول (۵-۲) مقادیر کمینه و بیشینه هر یک از پارامتر و تمرکز آنها نسبت به عملکرد دستگاه آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه بیان شده است. هم چنین میانگین مربعات خطای حاصل از تخمین هر یک از پارامترها نسبت به توان مصرفی آسیا محاسبه شد.

جدول ۵-۲- بازه تغییرات هر یک از پارامترها نسبت به توان مصرفی توسط PSO

MSE	بازه کاری مطلوب دستگاه	مقدار بیشینه	مقدار کمینه	پارامتر
-	۶۱۰۰-۶۵۰۰	۷۷۵۴	۴۸۰۹	توان (Kw)
۰/۰۵۰۴	۳۵-۳۸/۵	۴۷/۴۵	۱۶/۵۲	درصد پرشدگی
۰/۰۱۹۳	۹-۹/۴	۱۱/۰۲	۸/۵۷	درصد شارژ گلوله
۰/۰۳۳	۲/۵۵-۲/۷۵	۳/۸۴	۲/۴۷	چگالی شارژ توده آسیاب ($\frac{t}{m^3}$)
۰/۰۰۰۱	۵۰۰۰-۵۴۰۰	۶۰۲۵	۴۷۷۵	بار در گردش (t/h)
۰/۰۵۲	۲۳-۲۸	۳۸/۷۲	۱۵/۳۷	درصد پالپ
۰/۰۰۰۷	۴۹/۹۰-۵۵/۱۰	۵۷/۸۰	۴۸/۵۳	درصد جامد
۰/۰۰۰۱	۱۹۵-۱۹۲/۵	۲۱۰	۱۸۱	جرم گلوله (ton)

۵-۵- جمع بندی

در ابتدای این فصل به بررسی تعدادی از معادلات شاخص که بر محاسبه توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن کاربرد دارند، پرداخته شد. با توجه به نمودارها و نتایج حاصله نشان می‌دهد که نزدیک‌ترین مقادیر پیش بینی برای معادلات PM_1 و PM_7 است که از این معادلات برای مدل سازی و تعریف تابع هدف و تابع هزینه استفاده خواهد شد. سپس به تحلیل پارامترهای که بر روی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه پرداخته شد، نتایج حاصله نشان داد که پارامترهای ورودی سیستم عبارتند از: درصد پر شدگی، درصد شارژ گلوله، درصد پالپ و چگالی شارژ توده آسیا، که تاثیر مستقیم بر روی توان مصرفی آسیا دارد. در فصل بعدی از این نتایج بدست آمده برای مدل سازی مسئله مورد نظر استفاده خواهد شد.

فصل ششم:

بهینه‌سازی توان آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس
سرچشمه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام
ذرات

۶-۱- مقدمه

برای اطمینان از یکتایی جواب‌ها و افزایش سرعت تحلیل، پارامترهای بایستی شناسایی شوند که دارای شرایط زیر باشند:

- پارامترهای انتخاب شده اثر بیشتری بر روی توان مصرفی دستگاه داشته باشد.
 - پارامترهای انتخاب شوند که به دست آوردن یا اندازه گیری آن از طریق روش‌های دیگر مشکل باشد.
 - تعداد پارامترهای مجهولی که به راحتی شناسایی می‌گردند، کاهش پیدا کند.
- پیچیدگی توابع هزینه و محدودیت‌های متنوع الگوریتم‌های جستجو را به شدت محدود می‌کند، به طور خاص این پیچیدگی ناشی از سه عامل اساسی است: ۱- وجود معادلات متنوع ۲- وجود محدودیت‌های آزمایشگاهی ۳- حساسیت زیاد در تعریف تابع هدف (باقریان، ۱۳۹۱).

اگر تابع هزینه مسئله بهینه‌سازی تابعی از زمان نباشد، یک مسئله بهینه‌سازی ایستا خواهد بود. ولی اگر زمان نیز وارد تابع هزینه شود مسئله بهینه‌سازی پویا می‌شود. با گذشت زمان آستر و بالابرها در دستگاه مداوم در حال تغییر است، به طوری که کارایی آستر و بالابرها نو با کهنه با هم متفاوت است و هم چنین با توجه به شرایط کاری دستگاه اکثر پارامترها وضعیتی متغییر دارند، به همین دلیل مدل ایجاد شده برای مسئله یک مدل دینامیکی (پویا) است که با گذشت زمان وضعیت دستگاه مداوم در حال تغییر است.

۶-۲- مدل‌سازی توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس

سرچشمه

۶-۲-۱- روند مدل‌سازی مسئله مورد نظر

برای مدل‌سازی این پروژه با توجه به مراحل کاری الگوریتم ازدحام ذرات مراحل مدل‌سازی مسئله برای اجرای آن به ترتیب زیر است:

- مدل ارائه شده برای تعریف تابع هدف
- انتخاب تابع هزینه مورد نظر
- تنظیم پارامترهای الگوریتم
- محاسبات و گرفتن خروجی‌ها

۶-۲-۱-۱- مدل ارائه شده برای تعریف تابع هدف

در این مدل تابع هدف براساس کمینه کردن توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن است، لذا از آنجا که مسئله کمینه‌سازی است باید یک تابع هزینه‌ای تعریف شود تا مقدار تابع هدف را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تخمین زد. در مدل‌سازی مسئله مورد نظر باید پارامترهای معادله را به عنوان ورودی تابع هدف تعریف کرد که عبارتند از: درصد پرشدگی (بار حجمی)، درصد گلوله با تخلخل (درصد شارژ گلوله)، درصد پالپ و چگالی شارژ توده آسیای نیمه خودشکن. خروجی مدل هم میزان توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن است. برای تعریف تابع هدف با توجه به چرخه کاری آسیای مورد نظر مشاهده می‌شود که روند تغییرات توان مصرفی آسیای حالتی مشابه به تابع ریاضی معادله درجه دوم دارد که هنگامی که تغییرات روند نزولی دارد زمانی است که میزان توان دستگاه پایین بوده که معمولاً در مدل‌سازی مورد نظر آن را حد کمینه دستگاه که اگر توان دستگاه از این حد کمتر باشد به دلیل پایین آمدن سرعت دستگاه (کمتر از سرعت بحرانی) خردایش ناقص وجود دارد و در زمانی که روند تغییرات صعودی هستند زمانی است که میزان توان دستگاه بالا بوده (بیش از سرعت بحرانی) که در مدل‌سازی آنرا حد بیشینه دستگاه در نظر می‌گیرند که اگر توان دستگاه از این حد بیشتر باشد به دلیل افزایش سرعت متوسط از سرعت بحرانی چرخش آسیا باز هم

خردایش ناقص وجود دارد. در این مدل سازی حد بهینه (نقطه ست پوینت^۱) توان مصرفی که مد نظر است که با کمترین مقدار مصرف انرژی بهترین خردایش حاصل شود جستجو می‌شود، (منظور از بهترین خردایش تولید محصولی با ابعاد مورد نظر و مطلوب برای بخش جدایش) که این خود دارای محدودیت‌های است که برای تعریف تابع هدف باید آن‌ها را در نظر گرفت. در این بخش به تشریح مراحل مختلف تابع هدف خواهیم پرداخت.

۱- توان دستگاه: با توجه به شرایط کاری دستگاه، میزان توان مصرفی دستگاه بین $(4809 < PM < 7754)$ است که اولین محدودیت کاری این دستگاه است که در مدل سازی اعمال شده است که بازه کاری دستگاه در هنگام شروع کم بوده و به مرور افزایش خوراک ورودی میزان توان مصرفی هم افزایش می‌یابد. در هر دو مدل بهترین بازه کاری دستگاه بین $(6100$ تا $6500)$ کیلو وات است که میزان توان مصرفی نسبت به محصول خروجی مطلوب است که در مدل سازی مورد نظر نقطه بهینه توان مصرفی $(PM=6155)$ در نظر گرفته شده است.

$$P_{min} = 4809;$$

$$P_{max} = 7754 ;$$

$$PL = 6155 ;$$

۲- درصد پرشدگی: درصد پرشدگی میزان کانسنگ به همراه گلوله است که به آسیا وارد می‌شود، این پارامتر از اهمیت بالایی برخوردار است چون علاوه بر این که میزان خوراک ورودی تاثیر مستقیم بر روی توان دارند، افزایش درصد گلوله از دیگر محدودیت‌های است که علاوه بر تغییر مکانیزم خردایش از حالت سایشی به ضربه‌ای سوق می‌دهد و گاهی باعث سایش سریع آسترها و نهایتاً به شکست بالابرها می‌انجامد. درصد پرشدگی برای این دستگاه بین $(47/45 < Jc < 16/47)$ که با توجه به شرایط

^۱ Set point

کاری دستگاه بهترین بازه کاری آن بین (۳۵-۳۸/۵) است که دومین محدودیت در مدل ایجاد شده است.

$$JC_{min} = ۱۶/۴۷ ;$$

$$JC_{max} = ۴۷/۴۵ ;$$

۳- درصد شارژ گلوله: در صد شارژ گلوله علاوه بر مطالب بیان شده به دلیل هزینه‌های بالای مصرف فولاد یکی دیگر از پارامترهای تعدیل کننده در مدل ایجاد شده است که بازه کاری آن برای آسیای مجتمع مس سرچشمه بین (۱۱/۱۴ < Jb < ۸/۵۷) است و بهترین بازه کاری آن بین (۹-۹/۴) است که در مدل ایجاد شده در نظر می‌گیریم.

$$Jb_{min} = ۸/۵۷ ;$$

$$Jb_{max} = ۱۱/۱۴ ;$$

۴- تنظیم سرعت بحرانی: سرعت بحرانی مقدار سرعتی است که اگر سرعت دستگاه از آن بیشتر شود مواد در داخل آسیا به بدنه چسبیده و یا با شتاب زیاد به سمت روبرو پرتاب می‌شوند که علاوه بر سایش سریع آستر از حرکت آبشاری (حرکت ذرات در داخل آسیا که از پاشنه حرکت کرده و هنگام رسیدن به شانه بر روی ذرات موجود در پاشنه ریخته و باعث خردایش آنها در داخل آسیا می‌شود) مواد در داخل آسیا جلوگیری می‌کند، معمولاً این سرعت بین ۷۵ تا ۸۵ درصد سرعت بحرانی بوده که برای این آسیا مقدار آن ۸۰ درصد سرعت بحرانی در نظر گرفته شد.

۵- چگالی گلوله‌ها و کانسنگ: مقدار متوسط چگالی گلوله‌های فولادی مصرف شده برای آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه (۸ تن بر متر مکعب) است که در مدل سازی در نظر گرفته شد. مقدار چگالی مجتمع مس سرچشمه بین (۲/۴-۲/۸) است که در مدل سازی مسئله مقدار متوسط ۲/۶ برآورد شد که از دیگر محدودیت‌های مدل است که باید در نظر گرفته شود.

$$\rho_b = 8 ;$$

$$\rho_r = 2/6 ;$$

۶- تخلخل بستر: این پارامتر میزان ذراتی که بین سطح خارجی نسبت به قسمت داخلی (مواد غوطه ور شده) در داخل آسیا است را نشان می‌دهد که برای آسیاهای نیمه خود شکن بین ۳۰ تا ۴۰ درصد و مقدار متوسط آن ۳۵ درصد است که برای مدل ایجاد شده هم در همین بازه تعریف شده است.

۷- تعیین پارامترهای ثابت (M_r, K, A): به دلیل نداشتن پارامترهای ثابت بیان شده برای مجتمع مس سرچشمه به دلیل این که در بخش قبلی دو مدل بیان شده توسط آستین و نیل با ادوارد تعیین شد، از مقادیر ثابت مطالعات انجام شده نام برده‌گان استفاده می‌شود که علاوه بر این که مقادیر تعیین شده توسط آن‌ها بر روی آسیای نیمه خود شکن بوده است، کانسنگ مورد مطالعه هم مس بوده است. بعد از بیان تابع هدف و مشخص کردن پارامترها و محدودیت‌های آنها یک سری پیش فرض‌های در تعریف مسئله وجود دارد که عبارتند از:

۱- ثابت گرفتن تغییرات موجود در مشخصات خوراک ورودی (ابعاد ذرات، سختی کانسنگ، وزن مخصوص کانسنگ و...)

۲- ثابت گرفتن وزن و ابعاد گلوله‌های مصرفی

۳- ثابت گرفتن درصد پالپ و چگالی شارژ توده آسیا

۴- استفاده از مقادیر پارامترهای ثابت چون A, K, ϕ و ρ آسیاهای نیمه خود شکن مشابه

با توجه به تابع هدف تعریف شده باید یک تابع هزینه‌ای تعریف کرد تا بتواند مسئله را با محدودیت‌ها و شرایط عملیاتی دستگاه بدست آورد.

۶-۲-۱-۲- انتخاب تابع هزینه مسئله مورد نظر

برای محاسبه توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن اکثر معادلات شاخص کارهای آزمایشگاهی و تجربی هستند، بدین منظور ابتدا مقدار توان مصرفی با تمام معادلات موجود در جدول (۵-۱) مورد بررسی قرار گرفتند، نتایج نشان داد که معادله PM_۱ که توسط نیل و ادوارد^۱ ارائه شده و معادله PM_۷ که حالتی از معادله آستین است نتایج نزدیکی با داده‌های واقعی دارند که برای آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه استفاده شد. که بصورت زیر بیان شده است.

$$PM_1 = (1 - 1.03J_c) \left((1 - \varphi) \left(\frac{\rho_R}{M_R} \right) J_c + 0.6J_B \left(\rho_b - \frac{\rho_R}{M_R} \right) \right) \quad (1-6)$$

ρ_R : چگالی متوسط کانسنگ (تن بر متر مکعب)

ρ_b : چگالی گلوله‌ها (تن بر متر مکعب) (۸ برای فولاد)

φ : تخلخل بستر

J_c : کسری از حجم بخش استوانه‌ای آسیا که با بار آسیا (کانسنگ و گلوله‌ها) پر شده است.

J_B : کسری از حجم بخش استوانه‌ای آسیا که با گلوله‌ها پر شده است.

M_R : وزن کانسنگ در مجموع شارژ آسیا (کانسنگ و آب)

$$PM_7 = K \cdot D^{0.34} (1.21 - \varphi) \cdot C_s \cdot J_c \quad (2-6)$$

K : ضریب ثابت

D : قطر آسیا به متر

φ : تخلخل بستر

J_c : کسری از حجم بخش استوانه‌ای آسیا که با بار آسیا (کانسنگ و گلوله‌ها) پر شده است.

C_s : نسبت سرعت دورانی دستگاه به سرعت بحرانی

محدودیت‌های هر دو مدل ارایه شده به ترتیب زیر است:

^۱ Neale and Edward

۱- ثابت گرفتن چگالی متوسط کانسنگ

۲- در نظر نگرفتن تخلخل گلوله‌های مصرفی

۳- پارامترهای MR ، K و A براساس مقادیر نویسندگان معادله بوده که بصورت تجربی بدست آمده است.

۴- کنترل سرعت دورانی نسبت به سرعت بحرانی

برای محاسبه مقدار توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن برای هر مدل از تابع هزینه بیان شده استفاده می‌شود، که برای هر دو مدل تابع هدف همان کمینه کردن توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن خواهد بود.

۶-۱-۲-۳- تنظیم پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات

پس از معرفی تابع هدف و پارامترهای آن باید تابع هزینه‌ای تعریف شود تا که شرایط تابع هدف را فراهم سازد که با بررسی معادلات قبلی مناسب‌ترین معادلات که به شرایط کاری دستگاه و توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه نزدیک باشد به دست آمد. در این قسمت برای این که مدل ایجاد شده به الگوریتم مورد نظر معرفی شود تا با آن بتوان میزان توان مصرفی را تخمین زد باید ابتدا پارامترهای اصلی الگوریتم تنظیم شود و پس از آن نتایج حاصل از الگوریتم میزان توان مصرفی بهینه در شرایط فعلی خواهد بود. تنظیم پارامترهای این الگوریتم به ترتیب زیر خواهد بود.

۱- ابتدا نام تابع هدف را معرفی کرده و سپس تابع هزینه آن را معلوم می‌کنیم.

Function $z = \text{power}(x)$

Cost Function: $Z_1 = PM_1$

Cost Function: $Z_r = PMV$

۲- معلوم کردن تعداد متغیر تصمیم: مهمترین متغیر مدل مورد نظر توان مصرفی است بعد آن پارامترهای درصد پرشدگی و درصد شارژ گلوله که در تابع هدف آمده است.

۳- تعیین کردن حد بالا و حد پایین توان مصرفی که باید معرفی شود.

بعد از معلوم شدن متغیرهای مسئله، پارامترهای الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات را تنظیم می‌کنیم:

۱- تعداد تکرار الگوریتم که معمولاً از شرطهای توقف هم است.

۲- تعداد جمعیت اولیه که معمولاً بین ۵۰ تا ۱۰۰ در نظر می‌گیرند که از ابتدای شروع الگوریتم کم بوده و بعد برای بهبود نتایج کم کم افزایش می‌یابد.

۳- پارامتر بعدی ضریب اینرسی است که معمولاً از همان دستور کاهش نزولی این ضریب استفاده می‌شود که تعیین مقدار مناسب آن از افتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند.

۴- پارامتر بعدی ضرایب یادگیری شخصی و جمعی است که در الگوریتم اولیه مقدار آن ۲ بود ولی در الگوریتم اصلاح شده آن از مقدار $(C_1=C_2=1,4962)$ استفاده می‌شود که در این مدل از مقادیر اصلاح شده هم استفاده شده است.

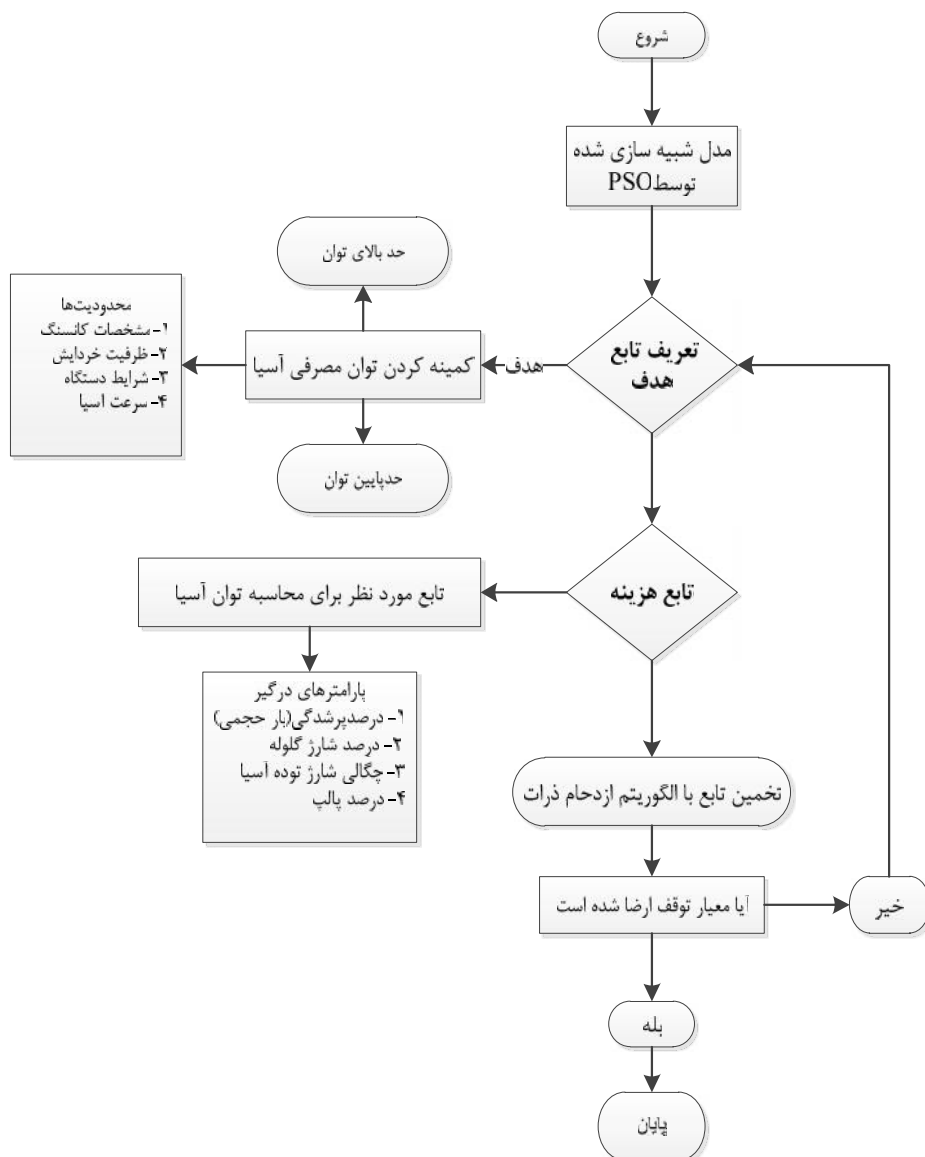
۵- آخرین پارامتر مقادیر I_1 و I_2 که از توزیع نرمال بین (۰ تا ۱) تعیین می‌شود.

۶-۱-۲-۴- محاسبات و گرفتن خروجی‌ها

پس از تعریف تابع هدف و تعیین تابع هزینه مورد نظر و تنظیم پارامترهای ورودی الگوریتم ازدحام ذرات، ساختار اصلی الگوریتم که برای هر ذره در فضای جستجو عبارت است از موقعیت فعلی هر ذره، تابع هدف با موقعیت متناظر، سرعت فعلی، بهترین موقعیت تجربه شده (بهترین خاطره شخصی) و مقدار تابع هدف با بهترین موقعیت تجربه شده‌اش (بهترین خاطره جمعی). این قسمت در هر تکرار دروه شده و در تکرار بعدی نتایج با استفاده از معادلات (۱-۳) و (۲-۳) به روز رسانی شده و برای هر

ذره موقعیت جدید با سرعت جدید در هر تکرار اضافه می‌شود. این جریان اطلاعاتی که از ابتدای اجرای برنامه وجود دارد و بدین صورت است که ذراتی که صلاحیت بهتری (موقعیت مناسب‌تر در فضای جستجو) دارند تا مراحل تکرار بالاتر هم بر روی جواب نهایی تاثیر مستقیم دارند. در این مدل خروجی آن توان مصرفی آسیا است که به عنوان بهترین هزینه در نظر گرفته شد و برای شرط توقف هم علاوه بر رسیدن به نتیجه مطلوب از دستور تعداد ارزیابی تابع هدف استفاده شده است.

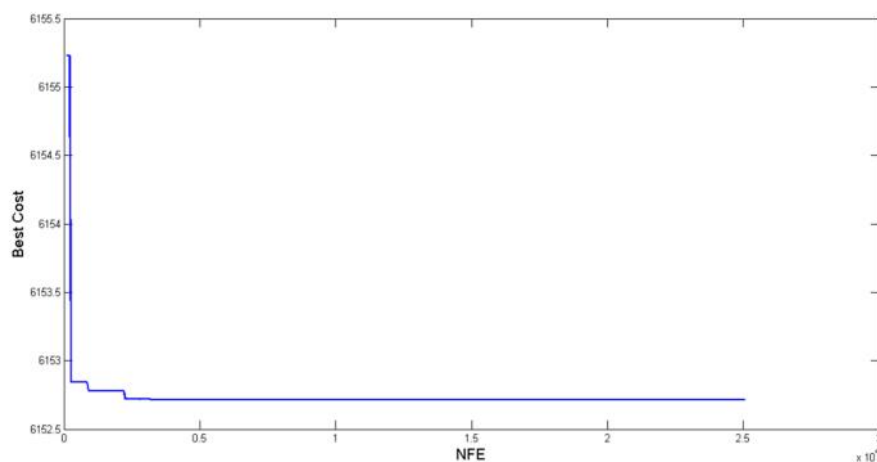
نمودار شکل (۶-۱) مراحل انجام مدل شبیه سازی شده برای تخمین توان مصرفی آسیای نیمه‌خودشکن با استفاده از الگوریتم PSO نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱- فلوجارت مدل سازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

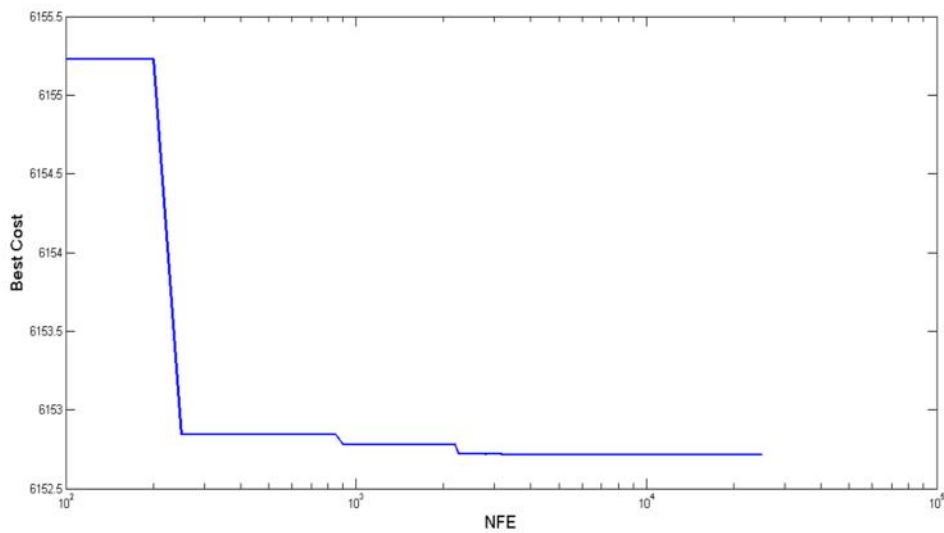
۶-۳- ارزیابی مدل PM_۱ با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات

پس از تعریف تابع هدف و انتخاب تابع هزینه، محاسبات کاملاً به صورت خودکار با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات انجام شد که خروجی مدل یک نمودار بوده که ستون عمودی همان بهترین هزینه^۱ یا توان مصرفی بهینه است و ستون افقی هم تعداد ارزیابی تابع براساس تعداد تکرار الگوریتم است. برای این که میزان تغییرات هر یک از معادلات را نسبت به این که مدل در بهینه‌های محلی افتاده باشد و برای کنترل میزان تکرار که مدل دچار رکود نشود محور افقی را نیمه لگاریتمی کرده تا بهتر بتوان این تغییرات را مشاهده کرد (شکل ۶-۳). نمودارهای نیمه لگاریتمی نشان می‌دهد که مدل با میزان تکرار انجام شده نتایج مناسبی دارد و نیازی به افزایش تعداد تکرار بر مطلوب کردن بهینه کلی نیست. برای هر سیکل کاری از ابتدای شروع کار دستگاه تا زمانی که دستگاه از مدار خارج شده توسط هر دو معادله تعدادی نمونه گرفته شده است که به ترتیب چرخه کاری دستگاه را در یک سیکل کاری نشان می‌دهد. در سیکل کاری تعیین شده برای مدل PM_۱ بهترین حالت کاری دستگاه، نقطه بهینه (PL) است که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است و برای تعیین شرط توقف از نمودار نیمه لگاریتمی شکل ۶-۳ استفاده شده است.



^۱ Best cost

شکل ۶-۲- نمودار معادله PM_۱ با روند بهبود جواب بعد تکرارهای متوالی



شکل ۶-۳- نمودار نیمه لگاریتمی معادله PM_۱ با روند بهبود جواب بعد تکرارهای متوالی

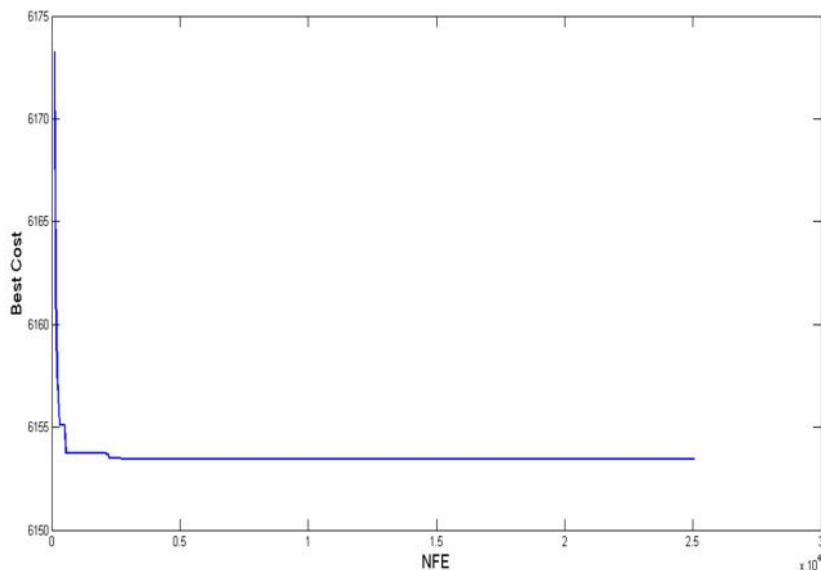
۶-۴- ارزیابی مدل PM_۷ با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات

مطابق شرایط مدل قبلی پس از تعریف تابع هدف و انتخاب تابع هزینه، محاسبات کاملاً به صورت خودکار با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات انجام شد که خروجی مدل یک نمودار بوده که ستون عمودی همان بهترین هزینه^۱ یا توان مصرفی بهینه است و ستون افقی هم تعداد ارزیابی تابع براساس تعداد تکرار الگوریتم است. در سیکل کاری تعیین شده برای مدل PM_۷ بهترین حالت کاری دستگاه، نقطه بهینه (PL) است که در شکل (۶-۴) نشان داده شده است و برای تعیین شرط توقف از نمودار نیمه لگاریتمی شکل (۶-۵) استفاده شده است.

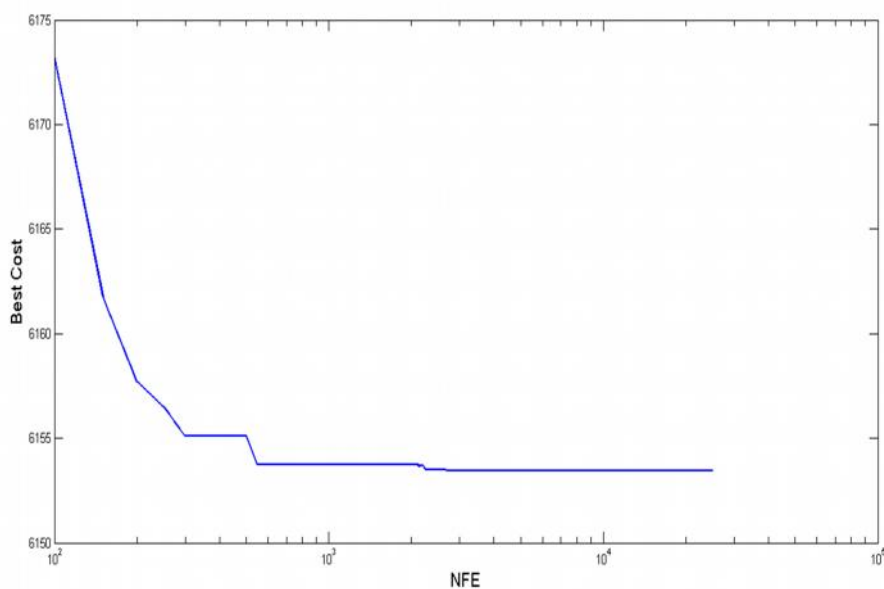
برای هر سیکل کاری از ابتدای شروع کار دستگاه تا زمانی که دستگاه از مدار خارج شده توسط هر دو معادله تعدادی نمونه گرفته شده است که به ترتیب چرخه کاری دستگاه را در یک سیکل کاری نشان می‌دهد، بر خلاف مدل PM_۱ که در آن سرعت دستگاه نسبت به سرعت بحرانی در نظر نگرفته شده،

^۱ Best cost

در مدل PM_{10} درصد سرعت دستگاه نسبت به سرعت بحرانی در نظر گرفته شده است که این پارامتر خود یک عامل تعدیل کننده در این مدل خواهد بود.



شکل ۶-۴- نمودار معادله PM_{10} با روند بهبود جواب بعد تکرارهای متوالی



شکل ۶-۵- نمودار نیمه لگاریتمی معادله PM_{10} با روند بهبود جواب بعد تکرارهای متوالی

برای هر دو مدل PM_{10} و $PM_{2.5}$ مقادیر پارامترهای ورودی معادلات برای تعیین نقطه بهینه دستگاه به طور خلاصه جدول (۶-۱) به طور آورده شده است، که در آن‌ها مقادیر پارامترهای ثابت A و K همان

مقادیری هستند که توسط خود نویسندگان معادله مطرح شده که به دلیل نبود این مقادیر برای مجتمع مس سرچشمه از آنها استفاده شد.

جدول ۶-۱- پارامترهای معادلات مدل شده با استفاده از الگوریتم PSO

پارامتر/معادله	PM ₁	PM _۷
ثابت A	۱/۰۳	-
ثابت K	-	۱۳/۸۸
{	۰/۳	۰/۳۵
Mr	۰/۸	-
...r	۲/۶	-
...b	۸	-
Jc	۰/۳۶	۰/۳۵
Jb	۹/۰۸	۹/۴۹
$\frac{J_b}{J_c}$	-	۰/۸۰

تعریف تابع هدف براساس کمینه کردن توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن برای هر دو مدل PM₁ و PM_۷ است. برای حل این مدل‌ها از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات استفاده شد. پارامترهای تنظیم الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات لازم برای جستجوی نقطه بهینه سیکل کاری برای هر دو مدل در جدول (۶-۲) آورده شده است.

جدول ۶-۲- مشخصات الگوریتم PSO مورد مطالعه

تعداد ذره یا جمعیت	۵۰
بعد فضای جستجو	یک بعدی
R ₁ و R _۲	مقادیر تصادفی بین ۰ تا ۱
C ₁ و C _۲	۱/۴۹۶۲
NFE	۴۰۳۰۰
W	۰/۹۹
تعداد تکرار	۱۰۰۰
مدت زمان اجرای برنامه	۲۷ ثانیه

۶-۵- اعتبار سنجی نتایج

برای تعیین دقت مدل سازی مورد نظر با استفاده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات با توجه به معادلات مدل شده و پارامترهای که به صورت مستقیم و غیر مستقیم بر روی توان دستگاه اثر دارد میزان توان مصرفی تخمین زده شده با میزان نتایج واقعی ثبت شده در کارخانه مورد مقایسه قرار گرفت و هم چنین میزان اختلاف توان مصرفی به دست آمده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات با مقادیر واقعی میزان خطای مدل مورد نظر می‌باشد. هم چنین برای ارزیابی مدل شبیه سازی شده از یک تابع درجه دوم که یک تابع محک^۱ هست استفاده شد که نتایج حاصل بسیار نزدیک به نتایج مدل شبیه سازی شده است.

در جدول‌های (۳-۶) و (۴-۶) میزان توان مصرفی محاسبه شده توسط هر دو مدل ایجاد شده با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات و میزان توان مصرفی اندازه گیری شده برای یک سیکل کاری دستگاه آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه برای هر دو مدل نشان داده شده‌اند. همچنین منحنی روند تغییرات توان واقعی با توان پیش بینی شده توسط PSO برای هر دو مدل ایجاد شده PM_۱ و PM_۷ در شکل (۶-۶) و (۷-۶) نشان داده شده که منحنی معادله PM_۱ که برای محاسبه توان نرمال شده نسبی بوده با نتایج واقعی و تجارب قبلی نزدیکی زیادی دارد.

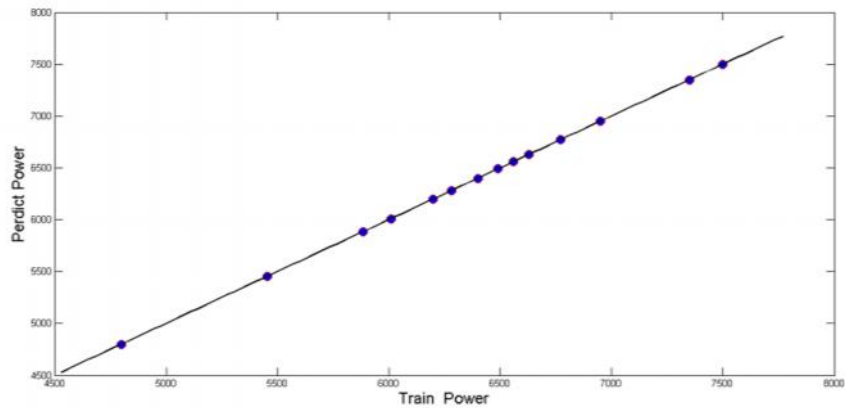
^۱ Bench Mark

جدول (۳-۶) میزان توان مصرفی محاسبه شده توسط مدل PM1 با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات و میزان توان مصرفی اندازه گیری شده برای یک سیکل کاری دستگاه آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه

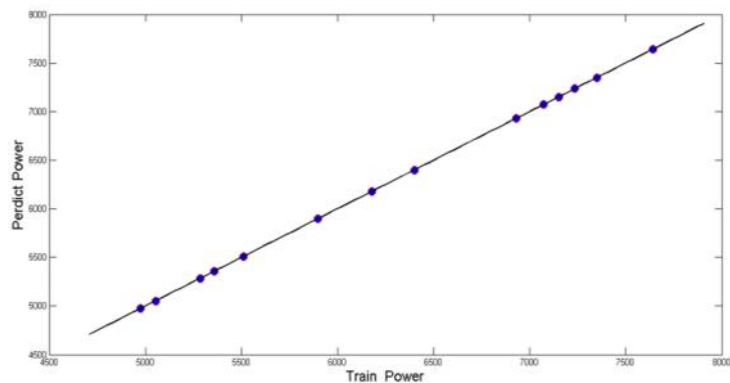
میزان توان مصرفی تخمینی توسط PSO به (KW)	میزان توان مصرفی قرائت شده (KW)	شماره نمونه
۴۸۰۰/۰۱	۴۸۰۰	۱
۵۴۵۳	۵۴۵۲/۹۸	۲
۵۸۸۶	۵۸۸۵/۹۸۶	۳
۶۰۱۰	۶۰۰۹/۹۷	۴
۶۲۰۰/۱	۶۲۰۰	۵
۶۲۸۰	۶۲۸۰	۶
۶۳۹۹/۹۸۹	۶۴۰۰	۷
۶۴۹۰	۶۴۸۹/۹۸	۸
۶۵۵۶	۶۵۵۵/۹۹	۹
۶۶۲۹/۹۹	۶۶۳۰	۱۰
۶۷۷۰	۶۷۶۹/۹۸	۱۱
۶۹۸۰	۶۹۷۹/۹۸۶	۱۲

جدول (۴-۶) میزان توان مصرفی محاسبه شده توسط مدل PMV با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات و میزان توان مصرفی اندازه گیری شده برای یک سیکل کاری دستگاه آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه

میزان توان مصرفی تخمینی توسط PSO به (KW)	میزان توان مصرفی قرائت شده (KW)	شماره نمونه
۴۹۷۵	۴۹۷۴/۹	۱
۵۰۵۳	۵۰۵۲/۹۹	۲
۵۲۸۶	۵۲۸۶	۳
۵۳۵۸	۵۳۵۷/۹۹	۴
۵۵۱۰	۵۵۰۹/۹۸	۵
۵۸۹۸/۹۹	۵۸۹۹	۶
۶۱۸۰	۶۱۸۰	۷
۶۳۹۹/۹۹	۶۴۰۰	۸
۶۹۲۹/۹	۶۹۳۰	۹
۷۰۷۱	۷۰۷۱	۱۰
۷۱۵۰	۷۱۴۹/۹	۱۱
۷۲۳۵	۷۲۳۴/۹۸	۱۲



شکل ۶-۶- مقایسه توان مصرفی پیش بینی توسط PSO برای معادله PM1



شکل ۶-۷- مقایسه توان مصرفی پیش بینی توسط PSO برای معادله PM7

با توجه به نتایج حاصل از شکل‌های (۶-۶) و (۶-۷) معلوم شد که شرایط کاری دستگاه و پیش بینی برای مدل PM1 به رفتار واقعی آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه نزدیکتر است به طوری که ابتدا با شروع کار دستگاه با ورود خوراک، توان مصرفی هم متناسب با آن افزایش یافته تا زمانی که به محدوده نهایی (نقطه اوج مصرف) رسیده و بعد از گذر از نقطه اوج به دلیل افزایش خوراک ورودی دستگاه از مدار خارج شده و توان رو به کاهش خواهد بود که کنترل این محدوده بخشی از هدف اصلی در تحقیق بود چون با عبور از این نقطه توان مصرفی به شدت افزایش می‌یابد و در نهایت

دستگاه باید برای وارد شدن مجدد به مدار تا زمانی که خوراک ورودی خارج شود باید به صورت آماده به کار^۱ باشد تا به مدار اصلی خردایش باز گردد که این معضل علاوه بر توان مصرفی بالا به قطعات دیگر دستگاه صدمه جدی وارد می‌کند. شرایط آماده به کار زمانی است که دستگاه در حال کار بوده ولی خوراکی وارد نمی‌شود تا زمانی که خوراک ورودی قبلی از دستگاه خارج شود. در مدل PM۱ بهترین بازه کاری بین (۶۱۰۰ تا ۶۵۰۰) با شرایط واقعی را دارد ولی در مدل PM۷ ابتدا توان شدیداً افزایش یافته بعد تقریباً ثابت بوده و بعد باز هم شروع به افزایش داشته که در این شرایط کنترل دستگاه برای جلوگیری از خارج شدن از مدار سخت‌تر خواهد بود.

برای مقایسه مدل شبیه سازی شده از معیار^۲ MSE یا میانگین مربعات خطا مطابق رابطه زیر استفاده شد که نتایج آن در جدول (۶-۵) آورده شده است.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{n} \quad (3-6)$$

Y میزان توان محاسبه شده از فرمول t ام با استفاده از مقادیر تخمین زده شده توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات طراحی شده، f میزان توان اندازه گیری شده در کارخانه در بار t ام و n تعداد اندازه گیری شده توان است.

جدول ۶-۵- مقدار معیار MSE هر یک از معادلات شبیه سازی شده

MSE	شماره معادله
۰/۰۰۶۱	معادله PM۱
۰/۰۳۷۶	معادله PM۷

^۱ Stand by

^۲ Mean Square Error

با توجه به جدول (۵-۶) مشاهده شد که هر دو معادله شبیه سازی شده دارای عملکرد خوبی هستند و معادله شماره ۱ PM از بهترین عملکرد و دقت برخوردار است.

۶-۶- جمع بندی

مسائل دنیای واقعی ماهیت پویا دارند یعنی در هدف بهینه یابی، نمونه مسئله یا در محدودیت یک مسئله بهینه یابی تغییراتی رخ می‌دهد، ممکن است بهینه آن مسئله تغییر کند به عبارت دیگر محیط تغییر کرده است. اگر این حالت رخ دهد وفق دادن راه حل با راه حل قدیمی ضروری است. بنابراین، بهتر است که الگوریتم بهینه یابی استفاده شود که قادر باشد به طور پیوسته راه حل را با محیط در حال تغییر وفق دهد و از نتایج بدست آمده گذشته مجددا استفاده کند.

ابتدا به بررسی معادلاتی که برای محاسبه توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن بود انجام گرفت، در این بررسی نشان داده شد که بیشترین نزدیکی معادلات به کارکرد آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه معادلات ۱ PM و ۲ PM است که از این معادلات برای مدل سازی و تعریف تابع هدف و استفاده از آن در روش بهینه سازی ازدحام ذرات بود. سپس دو معادله مورد نظر با توجه به پارامترهای ورودی شامل درصد پر شدگی، درصد گلوله با تخلخل (درصد شارژ گلوله)، درصد پالپ، چگالی شارژ توده آسیا و چگالی متوسط کانسنگ مس معدن سرچشمه و خروجی آن میزان توان مصرفی آسیا که با استفاده از روش الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات طراحی شد. برای بررسی عملکرد نتایج حاصله از مدل سازی انجام شده از مقادیر واقعی توان مصرفی آسیا که در کارخانه اندازه گیری شده است استفاده شد. با توجه به پارامترهای مورد بررسی مشاهده شد که درصد جامد، بار در گردش و جرم گلوله‌ها بازه تغییرات کمتری را نسبت به دیگر پارامترها بر روی توان مصرفی دارند که از ورودی مدل حذف شدند و میزان خوراک ورودی براساس ظرفیت دستگاه و شرایط کاری تعیین می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که عملکرد هر دو معادله رضایت بخش هستند ولی معادله توان نرمال شده نسبی برای محاسبه توان آسیا مجتمع مس سرچشمه (PM^۱) با معیار MSE ۰/۰۰۶۱ دارای بهترین عملکرد می‌باشد.

فصل هفتم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه گیری

با گسترش روز افزون در صنعت معدنکاری و استخراج مواد معدنی با عیار پایین و تناژ بالا یکی از سیاست‌های کلان اقتصادی در حوزه مهندسی معدن است، که برای رسیدن به یک ماده معدنی با عیار مطلوب در بخش فرآوری نیاز به خردایش زیادی است تا در مرحله جدایش کانه از باطله جدا شود. به همین دلیل بخش خردایش یکی از بخش‌های اصلی کارخانه فرآوری است که بیشترین مصرف انرژی را صرف می‌نماید (حدود ۶۰ درصد). آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه که قسمت اصلی مدار خردایش را تشکیل می‌دهد، یکی از قسمت‌های است که مصرف انرژی بالای را داراست و در سال‌های اخیر بررسی‌ها و مطالعات زیادی برای کنترل بهینه مصرف توان دستگاه انجام شد، اما به دلیل عوامل متعددی که به صورت مستقیم و غیر مستقیم بر روی توان دستگاه تاثیر دارند بهینه کردن توان مصرفی دستگاه کار مشکل و گاهی پیچیده خواهد بود. به دلیل این که اکثر بررسی‌های انجام شده کارهای آزمایشگاهی بوده که معمولا نیاز به زمان و هزینه‌های بالای را دارد و همچنین تعمیم نتایج کارهای انجام شده در حد پایلوت به مقیاس کارخانه اکثرا با مشکلات زیادی رو به رو می‌شود. استفاده از روش‌های هوشمند با هزینه و زمان خیلی کمتری می‌تواند برای پیش بینی شرایط کاری و کنترل بهینه با هدف کاهش مصرف توان با در نظر گرفتن تولید محصولی مناسب برای مرحله جدایش مطلوب باشد.

در این تحقیق از روش الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) که یکی از روش‌های هوش مصنوعی یا الگوریتم‌های تکاملی هست استفاده شد. به دلیل وجود عوامل درگیر و متعدد، مدل سازی برای تعریف تابع هدف و تابع هزینه به صورت زیر بیان شد: ابتدا از اکثر معادلات شاخص که برای محاسبه

توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن استفاده می‌شود، برای بررسی این که کدام یک با داده‌های واقعی نزدیکی بیشتری دارد تا در بخش بعد مورد استفاده قرار گیرد. در بخش بعد برای تعریف تابع هدف از این معادلات استفاده و نتایج آن به صورت نمودار نشان داده شد، نتایج حاصله از عملکرد دو معادله مدل شده نشان می‌دهد که معادله توان نرمال شده نسبی که این معادله بدون در نظر گرفتن ابعاد دستگاه بیان شد، با بهینه کلی خیلی خوبی به مقادیر واقعی نزدیک است. البته معادله تجربی که برای محاسبه توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن استفاده می‌شود، نتایج مناسبی حاصل شد. در این مدل سازی بازه تغییرات توان دستگاه $(4809 < P_m < 7754)$ ، بازه تغییرات در صد پرشدگی (بخشی از حجم داخلی آسیا که توسط گلوله و کانسنگ پر شده) $(167/47 < J_c < 47/45)$ ، بازه تغییرات درصد شارژ گلوله (بخشی از حجم داخلی آسیا که توسط گلوله پر شده است) بین $(11/14 < J_b < 8/57)$ ، میزان توان مورد نظر که در مدل سازی به عنوان بهینه کلی در نظر گرفته شده بود $(PL = 6155)$ ، طول دستگاه ۱۶ فوت ارتفاع دستگاه ۳۲ فوت است.

با توجه به نتایج هر دو مدل معلوم شد بهترین نتیجه در حالت کلی برای مدل PM_1 است که این نشان می‌دهد که اگر طراحی اولیه کارخانه صحیح انجام شود ابعاد دستگاه نقش موثرتری در میزان هزینه خواهد داشت و هم چنین چون مدل PM_1 که وابسته به ابعاد دستگاه نیست، پس ابعاد و ظرفیت دستگاه باید در طراحی اولیه کارخانه با توجه به ظرفیت تولید باید انتخاب شود. اگر نرخ خوراک ورودی از حد معمول کمتر شود میزان مصرف توان از حد بهینه کمتر شده و در نتیجه باعث هدر رفت انرژی می‌شود و تاثیر مستقیم بر روی ابعاد محصول خروجی دارد چون با کاهش بار ورودی مواد بیشتر در داخل آسیا مانده و بیشتر خرد می‌شوند و تولید نرمه هم افزایش می‌یابد و اگر بار ورودی از حد مجاز ظرفیت آسیا بیشتر شود که ممکن است باعث گذر از نقطه اوج شده واز کار افتادن دستگاه شود حتی علاوه بر افزایش توان مصرفی معمولاً به بالابرها (لیفترها) و آستر (لاینر) داخلی صدمه بیشتری وارد می‌آید. افزایش بار در گردش هم خود مستلزم مصرف بیشتر انرژی خواهد بود باید کنترل شود. هم چنین تاثیر درصد گلوله با تخلخل از حساسیت بالاتری نسبت به درصد پالپ در

مدل شبیه سازی شده دارد که به دلیل هزینه بالای مصرف فولاد باید به طور مداوم کنترل شود. تغییرات وزن مخصوص بر روی واسطه سنگی تاثیر مستقیم دارد که با کنترل آن می توان از مصرف بیشتر گلوله جلوگیری کرد. با وزن مخصوص کانسنگ می توان چگالی شارژ توده آسیا را کنترل کرد. در این مدل بعضی پارامترها به دلیل ساده تر کردن مدل مورد نظر مقادیر تجربی آن در نظر گرفته شده است که عبارتند از: در صد تخلخل بستر ، چگالی شارژ توده آسیا (بخشی از حجم آسیا که توسط آب و کانسنگ پر شده)، چگالی گلوله ها، تغییرات عیار و وزن مخصوص کانسنگ و مقادیر ثابت A و K که براساس مقادیر تجربی نویسندگان معادله استفاده شده است.

۷-۲- پیشنهادات

با توجه به تجربیات حاصل از این مطالعه و محدودیت های موجود، برای بهینه بودن مطالعات بعدی در حوزه بهینه سازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن در هر پروژه می توان موارد زیر را بیان کرد:

۱- در مدل سازی مورد نظر در صورت وجود مقادیر واقعی پارامترهای ثابتی چون A ، K ، M_r و Φ می تواند در تسهیل نتایج نقش بهتری داشته باشد.

۲- میزان درصد گلوله با تخلخل (شارژ گلوله) ورودی به دستگاه کنترل شود.

۳- میزان درصد پرشدگی (گلوله و کانسنگ) ورودی به دستگاه کنترل شود.

۴- میزان تخلخل نسبی بستر و میزان درصد تخلخل گلوله های فولادی بررسی شود.

۵- اعتبار تحقیقات انجام شده و نتایج آن به تعریف تابع هدف و مدل ساخته شده است که

معمولا عدم قطعیت را همراه دارد، چون با تغییر تابع هدف ممکن است خیلی از پارامترهای

که در نظر گرفته شده بی اثر شوند و پارامترهای دیگری دخیل شوند که پیشنهاد می شود در

مدل بعدی با تقسیم پارامترهای ثابت و متغییر از حساسیت سنجی هر کدام از پارامترها

انجام شود تا درمدل کردن کمتر با اعداد ثابت و تجارب شخصی دیگران که بر روی آسیاهای

مشابه بوده استفاده شود و هم چنین بعضی از پارامترها که مقدارشان براساس تجارب

شخصی شخص محقق بوده که ممکن است این نتایج بر روی دستگاه مورد نظر حاکم است و برای دستگاه های دیگر تغییرات گوناگونی داشته باشد.

منابع و مأخذ

باقریان، م. یک مدل کاربردی برای بهینه سازی مسیر بزرگراه به کمک الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، دانشگاه شریف، دانشکده عمران، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۹.

باقریان، م. بهینه سازی عملیات حاکی مسیر به کمک الگوریتم ازدحام ذرات، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰.

بنیسی، ص. مهندسی خردایش، جزوه درسی دانشگاه باهنر کرمان، ۱۳۷۵.
جهانی، م. بررسی مصرف انرژی در آسیاهای نیمه خودشکن و گلوله‌ای کارخانه پر عیارکنی ۲ مجتمع مس سرچشمه، دانشگاه تهران، دانشکده معدن، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۸.

خامسی، م. تحلیل برگشتی هوشمند خط ۲ مترو کرج، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۹.
خندان، م. و فرزنانگان، ا. مدل سازی ریاضی توان کشی در آسیاهای گردان، ششمین کنفرانس دانشجوی مهندسی معدن، ۳، ۲۴۹-۲۵۶، ۱۳۸۸.

رزانی، م. محقق، ا. ح. تحلیل دینامیکی برخورد گلوله به لاینر آسیاب نیمه خودشکن. دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران. دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل. ۱۳۸۸.

رضایی، ب. کانه آرایی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۳.

رضایی، ب. تکنولوژی فرآوری مواد معدنی، انتشارات نور، ۱۳۷۶.

سازمان نظام مهندسی معدن. معیارهای فنی انتخاب آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن، انتشارات سازمان نظام مهندسی معدن، شماره ۴۲، ۱۳۹۱.

شمس کیا، ف. کاربرد زنبور عسل در بهینه سازی مسایل ریاضی، دانشکده مهندسی فناوری اطلاعات، پروژه کارشناسی،

۱۳۹۱

شیبانی، م؛ میبدی، م، ر. یک مدل ترکیبی برای بهینه سازی (CLA-PSO)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، ۱۳۸۸.

عظیمی، ا. بنیسی، ص. لنگریزاده، غ. دهقانی، م. بررسی عملکرد شبکه تخلیه آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سرچشمه، نشریه دانشکده فنی، ۵، ۵۶۵-۵۷۵، ۱۳۸۷.

کارآموزیان، م. شفاهی، س، ض. منتظری، ح. زیدآبادی، ص. شبیه سازی توان مصرفی آسیای نیمه خودشکن کارخانه تغلیظ سرچشمه، یازدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسیین متالورژی ایران، ۱۳۸۷.

کلامی هریس، س، م. آموزش روش های بهینه سازی هوشمند، متلب سایت، ۱۳۸۹.

میبدی، م. ر. و شایگان پور، ن. الگوریتم بهینه یابی کلونی زنبورهای مصنوعی مبتنی بر مدل تابع تسهیم برای محیط های پویا، کنفرانس مهندسی کامپیوتر، ۱۳۸۸.

نعمت الهی، ح. کانه آرایبی، دوجلدی، انتشارات دانشگاه تهران، بهار ۱۳۸۴.

نوع پرست، م. قراباغی، م. عبداللهی، ه. مقدمه ای بر آسیاهای خودشکن ونیمه خودشکن، انتشارات نوآور، زمستان ۱۳۸۷.

هاسکینز، ج. و ویل یو، ا. دانشگاه آیداهو، هزینه های صنایع معدنی، ترجمه امیر شاهی، معاونت امور تولیدی سازمان برنامه و بودجه، تهران، ۱۳۶۸.

Austin, I, G. Minerals and Metallurgical Processing, ۱۹۹۰.

Apelt, T, A. Thornhill, N, F. Inferential measurement of SAG mill parameters V: MPC simulation, Minerals Engineering, ۲۲, ۱۰۴۵-۱۰۵۲, ۲۰۰۹.

Becker, J. Salazar, J. and Cubillos, F. Real-time optimization of SAG mill using genetic algorithm, Universidad de Santiago de Chile, ۲۰۰۸.

Bond, F, C. British Chemical Eng, ۱۹۶۱.

Bueno, M, P. Kojovic, T. Powell, M, S. Multi-component AG/SAG mill model, Minerals Engineering, ۲۰۱۲.

Burgess, D. Proceedings of SAGSEM '۸۹, SAG Milling Seminar, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Perth, pp. ۱۳۲-۱۷۰, ۱۹۸۹.

Cleary, W. Morrison, D. Prediction of 3D slurry flow within the grinding chamber and discharge from a pilot scale SAG mill, Minerals Engineering, ۳۹, ۱۸۴-۱۹۵, ۲۰۱۲.

Donko, Y. Shang, H. Time delay neural network modeling for particle size in SAG mill. Powder technology, ۲۰۵, ۲۵۰-۲۶۲, ۲۰۱۱.

Fengnian, S. Morrison, R. Andrew, C. Fraser, B. Fiesal, M. Comparison of energy efficiency between ball mills and stirred mills in coarse grinding, *Minerals Engineering*, 22, 673-680, 2008.

Galan, o. Barton, g, w. Romagnol, j, a. Robust control of a SAG mill. *Powder technology*, 124, 264-271, 2002.

Gutierrez , l, r and Sepulveda, j, e. *Centra Investigaciones de Minería y Metallurgia*, Santiago, Chile, 1983.

Hogg, R. and Fuerstenau, d, w. *Transactions, SME-AIME*, 1972.

Karamoozian, m. Shafaei, s, z. Kakaie, r. Semiautogenous Mill Liner Wear Kinetics Model, 11th International Conference on Automation In Mining ICAMC, Poland, 2008.

Karamoozian, m. Shafaei, z. Kakaie, r. Predicting The Semiautogenous Mill Liner Wear By Applying Grey Model, 11th INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING SYMPOSIUM, Turkey, 2008.

Karamoozian, m. Shafaei, z. Kakaie, r. Zeidabadi, s and Montazeri, h. Dynamic Modeling of SAG Mill Power Draw Using Neural Network Approach, 24th International Mineral Processing Congress (IMPC XXIV), China, 2008.

Karamoozian, m. Shafaei, z. Kakaie, r. Investigation of liner wear effect on semiautogenous mill operational parameters, *Mineral Processing MinProc*, South Africa, 2008.

Karamoozian, M. Shafaei, S, Z. Kakaie, r. Noaparast, m. A Novel Semiautogenous Mill Liner Wear Kinetics Model, *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, No. 11, 2009.

Kawatra, s, k. *Advances in comminution*, SME, 2006.

Kennedy, J. Eberhart, R. Particle Swarm Optimization, *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Network*, Piscataway, NJ, 1990.

Kennedy, J. and Eberhart, R, *Swarm Intelligence*, Academic Press. 1st ed , San diego, CA, 2001.

Kennedy, J. Shi, S. Fuzzy Adaptive particle Swarm Optimization, *IEEE*, 2001.

Maleki, m. Banisi, S. Moghaddam, A. Converting AG to SAG mills: The Gol-E-Gohar Iron Ore Company case, *Powder technology*, 217, 100-106, 2011.

Lynch, A, j. Rowland, c, A. *The History of Grinding*, Society of Mining Metallurgy and Exploration (SME), 2000.

MacPherson, A and Turner, R. *Mineral Processing Plant Design*, AX. Mular and

- R.B. Bhappu (eds), SME-AIME, New York, pp. 279-300, 1980.
- Morell, S. A new autogenous and SAG mill model for scale-up ,design and optimization ,17(3), 2003.
- Morrell, s. A new autogenous and semi- autogenous mill modeling for scale-up, design and optimization. Minerals Engineering , 17:437-440, 2004.
- Morrell, S. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 100, 1996.
- Morrison, r, d. Cleary,p,w.Using DEM to model ore breakage within a pilot scale SAG mill. Minerals Engineering, 17:1117-1124, 2004.
- Morrison, r, d. and Morrel, S. I, in Comminution Practices, R.K. Kawatra (ed), SME, Colorado, pp. 139-146, 1997.
- Morrell, s. A method for predicting the specific energy requirement of comminution circuits and assessing their energy utilisation efficiency, Minerals Engineering, 21:224-233, 2007
- Neale, A. J.and Edwards. R. P. SME Annual Meeting, Albuquerque, New Mexico, 1994.
- Rezaeizadeh, m. Fooladi, M. Powell, M. Mansouri, S, H.Experimental observations of lifter parameters and mill operation on power draw and liner impact loading, Minerals Engineering, 23:1182-1191, 2010.
- Salazar, j. magne, l. Acuna, G.and Cubillos,F.Dynamic modeling and simulation of SAG mills,mineral engineering, 2009.
- Sugeno, m. Industrial Applications of Fuzzy control,Elsevier, New York, 1980.
- Thathachar, M, A, L. Sastry, P, S, Varieties of Learning Automata:An overview, IEEE Transaction on System, Cybernetics- Part B:Cybernetics,Vol32, 2002.
- Venter, g. and Sobieski, J. Particle Swarm optimization ,Structural Dynamics, and Material Conference Denver, co, 2002.
- Weiss, N. L, Mineral processing Hand book .Society of mining Engineers, New York, 1980.

Abstract

Since much of the cost and energy consumption (about 60%) belong to the mineral processing sector, crushing machines, so measures must be considered in addition to achieving a desired size, the crushing excessive and indiscriminate use of materials power to prevent such an important role in the economic feasibility of the product and its price.

In most cases, due to the inherent complexity of operations, the multiplicity of factors involved and the lack of good basic design, performance crushing circuit is less than anticipated. Hence, numerous mathematical models and optimization techniques for determining the optimum operating conditions shredding machines and processes used. Today most engineering problems using evolutionary algorithms for economic reasons, and time management is growing strongly. However, the equations for determining the power consumption due to the many variables that are often not available, can not effectively predict the mill power draw to be applied. So at the end of a valid equations and parameters were examined to calculate the power of the two models can be normalized mill empirical model (Austin) for estimating industrial mills, more adapted to the actual data. Then the equations defining the objective function based on Particle Swarm Optimization was used to minimize the cost function based on the actual amount of power devices and power draw system modeling was considered as the global optimum. The results of the two models showed that the system has excellent performance for optimization of power draw is in mill and power equation in mill normalized error value 0.0061 has the best performance.

Keywords: Optimization, Mill power draw, Particle swarm optimization algorithm (PSO), Semi-autogenous mill (SAG mill) and Sarcheshmeh copper complex.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mine, Petroleum and Geophysics

M.S. Thesis

**Semi-autogenous mill power draw optimization of Sarcheshmeh
copper complex using Particle Swarm Optimization Algorithm**

Akbar Mohtasham

Supervisor(s):

Dr. M. Karamoozian

Advisor:

Dr.H.Mirzaie Nasirabad

January ۲۰۱۴