

بهینه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون اولیه کارخانه فسفات اسفوردی با روش شبیه‌سازی و جستجوی ژنتیک

زینب سادات میرزایی^۱؛ اکبر فرزنانگان^۲

۱- گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان mirzaei@farakap.com

۲- دانشیار دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران farzanegan@ut.ac.ir

چکیده

هیدروسیکلون یکی از مهم‌ترین تجهیزات در صنعت فراوری مواد معدنی برای جدایش ذرات در ابعاد ریز و با کارایی بسیار بالاست. از آنجا که هیدروسیکلون‌ها به‌طور گسترده با آسیاها در مدار بسته به‌کار می‌روند، بهینه‌سازی عملکرد آنها تأثیر مستقیم بر کارایی مدار خردایش خواهد داشت. تعیین بهترین مقادیر عوامل مؤثر بر عملکرد یک هیدروسیکلون مستلزم به کارگیری روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عددی است. در این پژوهش، شبیه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون اولیه مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی را با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز BMCS تحت MATLAB انجام دادیم. در این نرم‌افزار از روش تجربی پلیت برای پیش‌بینی عملکرد هیدروسیکلون و از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک (GA Toolbox) برای بهینه کردن متغیرهای ورودی به این روش استفاده نمودیم. برای تعیین شرایط عملیاتی بهینه، ابتدا تابع هدف را بر اساس توزیع اندازه مورد نظر در تهریز تعریف کردیم. سپس شبیه‌سازی‌های مکرر عملکرد هیدروسیکلون را با شبیه‌ساز BMCS تحت MATLAB، با تغییر خودکار متغیرهای ورودی با استفاده از جعبه ابزار جستجوی الگوریتم ژنتیک، انجام دادیم. نتیجه به دست آمده با روش فوق و پیش‌بینی توزیع اندازه مواد در جریان تهریز بر پایه شبیه‌سازی‌های مکرر و خودکار با برنامه BMCS معرف مقادیر بهینه متغیرهای ورودی است. این روش ابزاری قوی برای دستیابی به طراحی بهینه در وضعیت یکنواخت، در طرح‌های جدید و همچنین کارخانه‌های در حال بهره‌برداری را فراهم ساخته است.

کلمات کلیدی

هیدروسیکلون، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، BMCS

۱ مقدمه

در کارخانه‌های فراوری معمولاً بهینه‌سازی روی مدار خردایش که شامل دستگاه خردکننده و دستگاه طبقه‌بندی کننده است، انجام می‌شود. سرنند، هیدروسیکلون و جداکننده هوایی (سپراتور) نمونه‌هایی از دستگاه‌های طبقه‌بندی کننده هستند. بهینه‌سازی دستگاه‌های طبقه‌بندی (مانند هیدروسیکلون) از طریق تنظیم دقیق حد جدایش آنها انجام می‌شود و باعث کاهش بار در گردش، جلوگیری از بیش‌آسیاکنی و در نتیجه، عملکرد بهتر مدار خردایش می‌شود.

پیشرفت‌های اخیر در سخت‌افزار و نرم‌افزارهای کامپیوتری، امکان ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی را فراهم کرده است. این روش‌ها ابزاری قدرتمند برای مهندسان فراوری

هدف تمامی شیوه‌های بهینه‌سازی، بهبود عملکرد کارخانه و استفاده بهتر از انرژی و تجهیزات است. بهینه‌سازی ممکن است به‌صورت خارج از خط (با روش شبیه‌سازی) یا به‌صورت در خط (با روش‌های کنترل دستی و اتوماتیک) انجام شود. همچنین می‌توان بهینه‌سازی را در بخش خاصی از کارخانه یا در کل کارخانه اجرا نمود [۱].

مهندسان فراوری مواد معدنی، همواره با استفاده از شبیه‌سازهای کامپیوتری به دنبال بررسی و تعیین تأثیر تغییر شاخص‌های مهم شامل نرخ خوراک ورودی، درصد جامد، اندازه واسطه خردکننده و قابلیت خردایش در عملکرد مدار هستند [۱].

مدار خردایش، شاخص‌های قابل تغییر را به صورتی تعیین کند که همواره بهترین عملکرد از مدار خردایش، با توجه به هدف بهینه‌سازی، حاصل شود. تعداد این شاخص‌ها محدود نیست و شامل تمامی شاخص‌های قابل تغییر در هنگام عملیات می‌گردد [۲].

۲ + شیوه پلنت

در شبیه‌سازی، شیوه پلنت برای پیش بینی دانه‌بندی جریان‌های ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون و آهنگ جریان آنها بر اساس هندسه سیکلون و دبی جریان خوراک ورودی به سیکلون مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تجزیه و تحلیل فرایند، نمونه‌هایی از جریان‌های خوراک، ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون برداشته می‌شود. با تعیین دانه‌بندی نمونه‌های حاصل از این جریان‌ها و با داشتن داده‌های مربوط به شرایط عملیاتی یا اجرایی مدار به هنگام نمونه‌برداری، مثل آهنگ خوراک و درصد جامد، می‌توانیم شیوه پلنت را به منظور ارزیابی عملکرد سیکلون به داده‌های به‌دست آمده برازش نماییم [۳] - [۴].

شیوه پلنت با ۴ معادله زیر خلاصه می‌شود.

ایجاد کرده است تا بتوانند بهترین مقادیر الگوهای طراحی و عملکرد مدار را تعیین کنند [۲].

در این تحقیق نشان دادیم که با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی (Based Modular Comminution BMCS Simulator) تحت Matlab، تلفیق الگوریتم شبیه‌سازی با الگوریتم ژنتیک و تغییر در دبی جامد و دبی آب ورودی به هیدروسیکلون، می‌توانیم d_{50} جریان ته‌ریز را از ۲۹۷ میکرون به ۵۰۰ میکرون افزایش دهیم.

۲ خرم‌افزار BMCS

نرم‌افزار شبیه‌سازی BMCS نرم‌افزاری است که به زبان C نوشته شده است و در محیط DOSTM اجرا می‌گردد [۱]. این نرم‌افزار را اکبر فرزنانگان توسعه داده است و شیوه‌های ریاضی برای شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای، هیدروسیکلون، آسیای میله‌ای، غلتک‌های آسیاکنی فشار بالا، سرنده، نقطه به هم پیوستن جریان‌ها، نقطه جدا شدن جریان‌ها و نقاط همگرایی می‌باشد. در این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی هیدروسیکلون از شیوه پلنت استفاده می‌شود.

نرم‌افزار بهینه‌سازی BMCS تحت Matlab، که به تازگی توسعه داده شده است، قادر است با دریافت شرایط عملیاتی

$$S = \frac{1.9(D_u/D_o)^{3.31} (D_u^2 + D_o^2)^{0.36} h^{0.54} \exp(0.0054\phi)}{D_c^{1.11} H^{0.24}} \quad (1)$$

S نسبت نرخ حجمی جریان در ته‌ریز به نرخ حجمی جریان در سرریز، D_u قطر داخلی ته‌ریز، D_o قطر داخلی سرریز، D_c قطر سیکلون، ϕ کسر حجمی جامد در خوراک، h ارتفاع آزاد گرداب سیکلون، H افت فشار در طول هیدروسیکلون.

تیزی یا دقت جدایش، m نشان‌دهنده چگونگی عملکرد هیدروسیکلون است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$m = 1.94 \exp\left(-1.58 \frac{S}{S+1}\right) \left(\frac{D_c^2 h}{Q}\right)^{0.15} \quad (1)$$

R_v نرخ حجمی در ته‌ریز به نرخ حجمی در خوراک می‌باشد:

$$R_v = \frac{S}{S+1} \quad (2)$$

همچنین پلنت حد جدایش تصحیح شده هیدروسیکلون را برحسب میکرون، براساس متغیرهای عملیاتی و هندسه

هیدروسیکلون به صورت زیر بیان کرده است:

$$d_{50c} = \frac{50.5 D_c^{0.46} D_i^{0.6} D_o^{1.21} \exp(0.063\phi)}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (\rho_s - \rho)^{0.5}} \quad (3)$$

D_i قطر دهانه ورودی، Q نرخ حجمی ورودی به سیکلون [۴].

۳ بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازها

بهینه‌سازی همراه با شبیه‌سازی، به فرایند یافتن شرایط بهینه سیستمی گفته می‌شود که عملکرد آن با استفاده از شبیه‌ساز تخمین زده شده است [۵].

در حالت کلی، یک شبیه‌ساز n متغیر ورودی و m متغیر خروجی دارد. بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی تلاش می‌کند تا بهترین وضعیت متغیرهای ورودی را که منجر به بهینه‌سازی متغیرهای خروجی می‌شوند، به‌دست آورد [۶]. ساختار بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی، از دو بخش اصلی مدول

ساختارها اعمال می‌نمایند. این الگوریتم‌ها غالباً به‌عنوان روش کارآمد برای بهینه‌سازی توابع شناخته می‌شوند. به‌کارگیری الگوریتم‌های ژنتیک با ایجاد تصادفی یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها آغاز می‌شود. سپس این ساختارهای اولیه ارزیابی می‌شوند و با توجه به میزان شایستگی به آنها فرصت داده می‌شود تا تولید مثل کنند [۷].

۴ بیان مسئله

هیدروسیکلون اولیه موجود در مدار آسیاکنی کارخانه فراوری فسفات اسفوردی، در مدار بسته با آسیای گلوله‌ای قرار دارد. اما در این پژوهش، هدف تنها بهینه‌سازی هیدروسیکلون موجود به‌صورت باز است به گونه‌ای که میزان d_{80} ته‌ریز هیدروسیکلون از ۲۹۷ میکرون به ۵۰۰ میکرون برسد و به این ترتیب از ورود ذرات زیر ۲۰ میکرون به ته‌ریز و ایجاد اشکال در فلوتاسیون، جلوگیری شود. مشخصات این هیدروسیکلون در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱: مشخصات هیدروسیکلون اولیه موجود در مدار آسیاکنی

فشار سیکلون (bar)	ارتفاع آزاد (cm)	قطر لوله ورودی (cm)	قطر ته‌ریز (cm)	قطر سرریز (cm)	قطر سیکلون (cm)
۰/۱۶	۱۸۰	۴۴/۵	۷/۶۲ و ۱۰/۱۶	۲۰/۳۲ و ۲۲/۸۶	۵۰

جدول ۲: داده‌های ورودی به نرم‌افزار BMCS و برخی اطلاعات خروجی از آن

قطر ته‌ریز (cm)	قطر سرریز (cm)	دبی جامد (t/h)	محتوی جامد (%)	حد جدایش پس از شبیه‌سازی (μm)	جرم عبور کرده از سرنده ۵۰۰ میکرون، پس از شبیه‌سازی (%)
۷/۶۲	۸۶/۲۲	۲۴۴/۵۸	۵۵	۱۷۹	۸۵/۱۶

توجه به آنچه که از نظر فیزیکی در کارخانه قابل اجراء است، بازه مناسب برای دبی آب و دبی جامد ورودی به هیدروسیکلون، به‌ترتیب ۲۴۵ و ۲۰۱ تن در ساعت در نظر گرفته شد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌کنید، جستجو پس از دستیابی به میزان دقت ۰/۰۰۱ بین هر بار اندازه‌گیری پایان یافت و مقادیر مناسب برای دبی آب و دبی جامد به‌دست آمد.

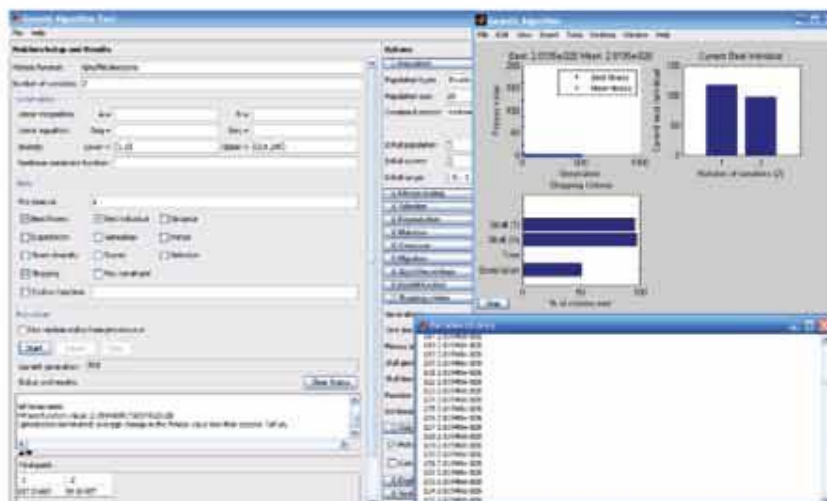
شبیه‌سازی و مدول بهینه‌سازی تشکیل شده است. شبیه‌سازی، وضعیت دستگاه مورد نظر را پیش‌بینی می‌کند و بهینه‌سازی هم روش جستجوی مستقیم یا روش جستجو بر اساس الگوریتم ژنتیک است. هر دو مدول شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای یافتن بهترین مقادیر برای متغیرهای ورودی باید یکی شوند [۶]. گام مهم در بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی، تعیین مسئله است. در این مرحله، ابتدا متغیرهای تصمیم‌گیری، تابع هدف و قیدها تعیین می‌گردند. سپس راهبرد مناسبی برای بهینه‌سازی انتخاب می‌شود. در بهینه‌سازی غیر خطی، از روش‌های اکتشافی مانند الگوریتم‌های ژنتیک، روش‌های شبیه‌سازی گرم و سرد کردن و روش‌های جستجوی پیچیده استفاده می‌شود. [۲].

۳ الگوریتم ژنتیک

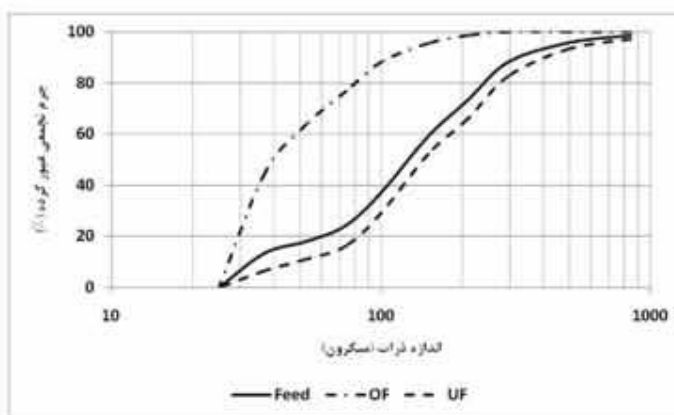
الگوریتم‌های ژنتیک (GA) یکی از اعضای خانواده روش‌های محاسباتی الهام گرفته از روند تکامل است. این الگوریتم‌ها راه‌حل‌های احتمالی یک مسئله را در قالب کروموزوم‌های ساده‌ای کد می‌کنند و سپس عملگرهای ترکیبی را بر روی این

۵ بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار BMCS تحت Matlab

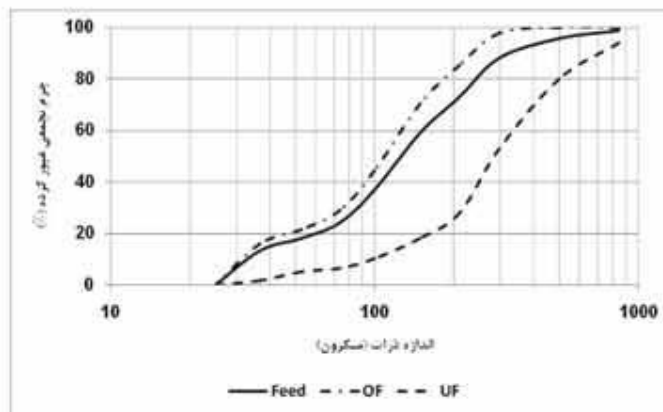
پس از تنظیم تابع شایستگی، با هدف یافتن بهترین مقدار برای دبی آب و دبی جامد خوراک هیدروسیکلون، به‌منظور افزایش d_{80} ته‌ریز هیدروسیکلون از ۲۰۰ میکرون به ۵۰۰ میکرون، با استفاده از نرم‌افزار BMCS تحت Matlab، بهینه‌سازی انجام گردید. در اجرا کردن الگوریتم ژنتیک، با



شکل ۱: صفحه تنظیمات الگوریتم ژنتیک در نرم افزار Matlab



شکل ۲: دانه بندی جریان های اطراف هیدروسیکلون پیش از بهینه سازی



شکل ۳: دانه بندی جریان های اطراف هیدروسیکلون پس از بهینه سازی

متر مکعب در ساعت به ۱۳۰ متر مکعب در ساعت کاهش یابد. در جدول های ۴ و ۵ نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده از BMCS بر اساس نتایج به دست آمده از بهینه سازی قابل مشاهده می شود.

پس از انجام بهینه سازی، مقادیر مناسب برای دو مجهول مسئله، دبی جامد و دبی آب ورودی به هیدروسیکلون، طبق جدول ۳ به دست آمد. همانگونه که مشاهده می شود، برای دسترسی به هدف مورد نظر، لازم است مقدار دبی پالپ از ۲۷۰

به دست آورد. استفاده از این نرم‌افزار موجب صرفه‌جویی بسیار در وقت و هزینه می‌گردد.

هیدروسیکلون موجود در مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی در مدار بسته با آسیای گلوله‌ای قرار دارد و برای بهینه‌سازی نهایی لازم است شرایط کل مدار خردایش با هم در نظر گرفته شود.

در بهینه‌سازی‌ای که روی هیدروسیکلون در این پژوهش انجام دادیم، مشاهده شد که با تنظیم دبی جامد و آب خوراک سیکلون به ترتیب روی ۱۱۷/۳ و ۹۶/۸ تن در ساعت، می‌توانیم مقدار d_{80} را در جریان ته‌ریز از ۲۹۷ میکرون به ۵۰۰ میکرون افزایش دهیم. همزمان با این بهبود، مقدار تیزی جدایش به ۳/۷ افزایش می‌یابد.

۷ تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از همکاری کارکنان مجتمع فسفات اسفوردی، به ویژه مدیریت محترم گروه فرایند آقای مهندس توکلی، به خاطر در اختیار گذاردن اطلاعات مورد نیاز صمیمانه سپاسگزار می‌نمایند.

۸ مراجع

- [1] Farzanegan; A., 1998, Knowledge-Based optimization of mineral grinding circuits, Ph.D Thesis, McGill University, Canada.
- [2] Farzanegan, A. and Vahidipour, S. M., 2009, Optimization of comminution circuits simulations based on genetic algorithms search method, Minerals Engineering, Vol. 22, Issues 7-8, pp. 719-726
- [3] Plitt, L.R., 1976. A mathematical model of the hydrocyclone classifier. CIM Bulletin 69 (776), 114-123.
- [4] King, R. P., 2001. Modeling and simulation of mineral processing systems, Butterworth, Heinemann.
- [5] Kabirian, A., Olafsson, S., 2007. Allocation of simulation runs for simulation optimization. In: Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, pp. 363-371.
- [6] Carson, Y., Maria, A., 1997. Simulation optimization: methods and applications. In: Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, pp. 118-126.
- [۷] کیا، سید مصطفی، (۱۳۸۸) الگوریتم‌های ژنتیک در **Matlab**، انتشارات کیان رایانه سبز، تهران

جدول ۳: مقایسه شاخص‌های عملیاتی مختلف پیش و پس از بهینه‌سازی

شاخص شرایط عملیاتی	قبل از بهینه‌سازی	بعد از بهینه‌سازی
دبی جامد (t/h)	۲۴۴/۵۸	۱۱۷/۳۱
محتوی جامد (%)	۵۵	۵۴/۷
دبی آب (t/h)	۲۰۰/۱۱	۹۶/۸۱
دبی پالپ (m ^۳ /h)	۲۷۰	۱۳۰
حد جدایش تصحیح شده (μm)	۱۷۹	۲۴۶
d_{80} ته‌ریز (μm)	۲۹۷	۵۰۰

جدول ۴: دانه‌بندی جریان‌های اطراف سیکلون پس از شبیه‌سازی بر اساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی

اندازه	خوراک سیکلون	ته‌ریز سیکلون	سرریز سیکلون
۸۴۱	۱/۳۰	۶/۰۵	۰/۰۰
۵۰۰	۳/۰۰	۱۳/۹۵	۰/۰۰
۲۹۷	۷/۶۰	۲۷/۰۳	۲/۲۸
۲۱۰	۱۵/۰۰	۲۴/۹۰	۱۲/۲۹
۱۴۹	۱۴/۰۰	۹/۹۰	۱۵/۱۲
۱۰۰	۲۲/۱۰	۸/۰۷	۲۵/۹۴
۷۴	۱۲/۹۰	۳/۷۹	۱۵/۴۰
۵۳	۶/۱۰	۱/۶۴	۷/۳۲
۳۷	۴/۶۰	۱/۲۰	۵/۵۳
۲۵	۱۳/۴۰	۳/۴۷	۱۶/۱۲

جدول ۵: شاخص‌های شیوه پلایت پس از شبیه‌سازی بر اساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی

۲۴۶	d_{0-c}
۲۸/۰۵۰	P
۰/۱۱۰	S
۳/۷۱۰	m
۰/۰۶۰	R_f

۶ نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی دستگاه‌های طبقه‌بندی کننده باعث مصرف کمتر انرژی، کیفیت بالاتر محصول و افزایش ظرفیت تولید در مدارهای آسیاکنی می‌شود. نرم‌افزارهای شبیه‌ساز ابزار علمی برای انجام چنین شبیه‌سازی‌هایی هستند. با استفاده از نرم‌افزار BMCS تحت Matlab می‌توان مقدار بهینه شاخص‌های مختلف مؤثر بر عملکرد مدار را تحت قیود عملیاتی معین که مهندسان کارخانه تعریف می‌کنند جستجو و