به‌کارگیری الگوریتم وراثتی هدایت‌شده در بهینه‌سازی چند هدفه‌ی ترکیب مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند

درنا پیروزان[۱]، محسن یحیایی[۲]، صمد بنیسی[۳]*

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲- دکتری فرآوری مواد معدنی، مرکز تحقیقاتی JK دانشگاه Queensland، استرالیا
۳- استاد بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت مهر ۹۰، پذیرش اردیبهشت ۹۱)

چکیده

در فرآیند فلوتاسیون برای جدایش مطلوب ذرات اغلب به بیش از یک مرحله نیاز است. طراحی مدارهای فلوتاسیون به طور معمول بر اساس قوانین تجربی است. به همین دلیل، در اکثر موارد آن‌ها در شرایط بهینه کار نمی‌کنند. برای طراحی و بهینه‌سازی مدارهای فلوتاسیون می‌توان از الگوریتم بهینه‌ساز وراثتی استفاده کرد. در مسئله بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون، کارایی متالورژیکی مدار (راندمان و محتوی خاکستر) را می‌توان به عنوان تابع شایستگی برای الگوریتم وراثتی تعریف کرد با توجه به این که هر یک از این دو عامل راندمان و محتوی خاکستر کنسانتره در جهت مخالف هم حرکت می‌کنند نیاز به روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه است. بهینه-سازی ترکیب مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند با دو روش مجموع وزن‌دار و بهینه Pareto انجام شد. با انجام بهینه‌سازی این امکان فراهم شد تا با حفظ کیفیت کنسانتره نهایی (خاکستر کمتر از ۱۱ درصد) راندمان از ۵۷/۶ درصد در مدار اولیه به ۶۵/۸ درصد در بهترین ترکیب مدار افزایش یابد. با اجرایی کردن مدار بهینه پیشنهادی در کارخانه، راندمان مدار جدید نسبت به مدار اولیه ۶/۷ درصد افزایش یافت. مقایسه انحراف معیار نسبی راندمان و محتوی خاکستر به دو روش مجموع وزن‌دار و بهینه Pareto نشان داد که نتایج حاصل از روش بهینه Pareto پایدارتر است.

کلمات کلیدی

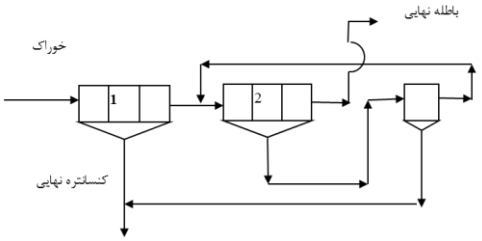
فلوتاسیون، بهینه‌سازی، چیدمان مدار، الگوریتم وراثتی

*نویسنده مسئول: banisi@mail.uk.ac.ir

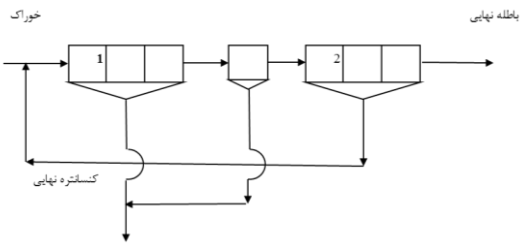
۱- مقدمه

۱-۱- چیدمان مدار

در فرآیند فلوتاسیون برای جدایش مطلوب ذرات اغلب از مدارهای چند مرحله‌ای با جریان‌های برگشتی استفاده می‌شود. افزایش کارایی و بهره‌وری مدارهای فلوتاسیون علاوه بر بهبود عوامل مربوط به فرآیند فلوتاسیون، نیازمند تعیین ترکیب بهینه سلول‌ها و اتصال بین آن‌ها نیز است[۱][۲]. برای مثال، در شکل ۱ دو ترکیب ممکن از یک مدار سه مرحله‌ای فلوتاسیون زغال‌سنگ شامل دو ردیف سه سلولی و یک ردیف تک سلولی نمایش داده‌شده است. اگر خوراکی با یک مشخصات معین به مدار (الف) وارد شود، مدل‌سازی سینتیکی این مدار نشان می‌دهد که محتوی خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان مدار به ترتیب برابر با ۱۱ درصد و ۶۴/۷ درصد خواهد بود. درحالی‌که با تغییر ترکیب مدار به حالت (ب) و ورود خوراک مشابه به مدار جدید، محتوی خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان به ترتیب برابر با ۱۱ درصد و ۶۵/۸ درصد حاصل خواهد شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر چیدمان مدار از حالت (الف) به (ب) بدون تغییر در شرایط خوراک ورودی و ردیف‌های فلوتاسیون ضمن حفظ کیفیت محصول نهایی، راندمان مدار بیش از یک درصد افزایش پیدا خواهد کرد. به طور یقین نمی‌توان گفت که مدار (ب) بهترین ترکیب است. زیرا ممکن است ترکیب‌های دیگری نیز باشند که هنوز بررسی نشده‌اند.



مدار (الف)_ راندمان: ۶۴/۷ درصد، محتوی خاکستر محصول: ۱۱ درصد



مدار (ب)_ راندمان: ۶۵/۸ درصد، محتوی خاکستر محصول: ۱۱ درصد

شکل۱: تأثیر ترکیب سلول‌های فلوتاسیون بر کارایی کل مدار

۱-۲- هدف و ضرورت انجام تحقیق

با توجه به تأثیر ترکیب مدارهای فلوتاسیون در کارایی آن‌ها می‌توان به اهمیت بهینه کردن چیدمان مدار در افزایش کارایی آن پی برد. یافتن بهترین ترکیب از میان ترکیب‌های ممکن، هدف بهینه‌سازی ترکیب مدارهای فلوتاسیون است. به دلیل گستردگی فضای جستجو و پیچیده بودن تابع هدف برای هر ترکیب، نیاز به یک الگوریتم بهینه‌سازی قوی جهت بررسی همه ترکیب‌ها و یافتن ترکیب بهینه در کمترین زمان ممکن کاملاً مشهود است. الگوریتم وراثتی از جمله روش‌های بهینه‌سازی است که با الگوبرداری از قوانین وراثت طبیعی، یافتن جواب بهینه را در مسائل پیچیده و با فضای جستجوی پر اغتشاش ممکن می‌سازد[۳][۴]. انتخاب و محاسبه تابع شایستگی مناسب در الگوریتم وراثتی از اهمیت زیادی برخوردار است. در مسئله بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون، کارایی متالورژیکی مدار را می‌توان به عنوان تابع شایستگی برای الگوریتم تعریف کرد. محاسبه کارایی متالورژیکی مدار خود نیازمند مدل‌سازی فلوتاسیون برای هر مدار است. از این رو می‌توان به اهمیت مدل‌سازی قبل از بهینه‌سازی ترکیب مدار پی برد[۲][۴].

۱-۳- کاربرد مدل‌سازی در تعیین تابع هدف

مهم‌ترین مرحله در بهینه‌سازی ترکیب مدار، مدل‌سازی فرآیند فلوتاسیون است. زیرا در این بخش تابع هدف که شاخص بهینه بودن ترکیب مورد بررسی است، تعیین می‌گردد. در واقع برای بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون، ابتدا باید فرآیند فلوتاسیون شبیه‌سازی شود[۵][۶]. بخش مدل‌سازی فلوتاسیون در همه الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیب مدار، ثابت است. هدف نهایی الگوریتم بهینه‌ساز، بیشینه کردن تابع هدف است. مدل‌سازی در واقع بیان ریاضی رابطه متغیرهای تأثیرگذار با کارایی فلوتاسیون است. با مدل‌سازی فلوتاسیون، می‌توان پارامترهای متالورژیکی (راندمان و خاکستر محصول) فرآیند را با توجه به تغییر در متغیرهای فلوتاسیون پیش‌بینی نمود. برای مدل‌سازی فلوتاسیون به طور معمول از مدل سینتیکی مرتبه اول با ثابت نرخ توزیع‌شده استفاده می‌شود. مهم‌ترین پارامتر در این مدل‌ها، ثابت سینتیک خوراک فلوتاسیون بوده و تفاوت عمده در انواع مدل‌های سینتیکی، تفاوت در نحوه بیان ثابت سینتیک فلوتاسیون است. با توجه به این که پارامترهای مدل سینتیکی، در صنعت قابل اندازه‌گیری است، با شبیه‌سازی سینتیکی مدار فلوتاسیون می‌توان ساختار مدار فلوتاسیون را بهینه کرد[۶][۷][۸].

۱-۴- بهینه‌سازی مسائل چندهدفه

در اغلب مسائل مهندسی نیاز به برآورده کردن چند هدف است و فضای جستجوی این مسائل بسیار پیچیده است. عموماً در این قبیل مسائل، هدف‌ها با یکدیگر در تعارض هستند به گونه‌ای که بهینه کردن یک هدف، ما را از رسیدن به سایر هدف‌ها دور می‌کند. به عنوان مثال در مسئله بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون در کارخانه زغالشویی، دو هدف کاهش خاکستر محصول و افزایش راندمان مد نظر است. طبیعی است که اگر هدف تنها کاهش خاکستر باشد، از هدف دوم که افزایش راندمان است، بسیار فاصله گرفته خواهد شد و بالعکس. در مسائل چندهدفه، مهندسین به دنبال بهترین مصالحه بین همه هدف‌ها هستند. از این رو، همواره در بهینه‌سازی مسائل چندهدفه مجموعه‌ای از بهترین جواب‌ها ارائه می‌شود[۹][۱۰].

۱-۴-۱- روش مجموع وزن‌دار

یکی از روش‌های متداول در حل مسائل چندهدفه، روش مجموع وزن‌دار است. در این روش، مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه با جمع وزن‌دار هدف‌ها تبدیل می‌شود (رابطه ۱).

$$y = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \cdots + w_k f_k = \sum_{i=1}^{k} w_i f_i \qquad (۱)$$

که در این رابطه، f_i میزان شایستگی برای هدف i ام و w_i وزن مربوط به هدف i ام است. به طور معمول این وزن‌ها ثابت هستند و توسط کاربر تعیین می‌شوند. فرض بر این است که وزن‌ها به گونه‌ای هستند که هدف‌های مختلف را به مقیاس درآورده و شرایط استفاده از قالب جمع‌پذیری بر آن‌ها حاکم است. در این روش، عموماً از وزن‌های نرمال شده استفاده می‌شود (مجموع تمام وزن‌ها برابر با یک است) و در هر اجرا تنها یک جواب به دست می‌آید. در این روش، استفاده از w_i های متفاوت، منجر به تولید جواب‌های متفاوت خواهد شد[۴][۱۰].

۱-۴-۲- روش Pareto

یکی از روش‌های بهینه‌سازی در حل مسائل چندهدفه روش بهینه‌سازی Pareto است. بر خلاف مسائل تک‌هدفه که در آن‌ها تنها یک جواب بهینه وجود دارد، در این روش مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه به دست می‌آیند که بر یکدیگر برتری ندارند و اصطلاحاً به آن‌ها بهینه Pareto گفته می‌شود و راه حل بهتری نسبت به آن‌ها با در نظر گرفتن همه هدف‌ها در مجموعه جواب‌ها وجود ندارد [۹]. در مسئله بهینه‌سازی مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند، رسیدن به دو هدف مورد نظر است. هدف اول بیشینه راندمان (f_1) و هدف دوم بیشینه شاخص خاکستر (f_2) است که به صورت رابطه (۲) تعریف شده است.

$$f_2 = \begin{cases} \dfrac{Ash}{Ash_{desired}}, & if\ Ash < Ash_{desired} \\ \dfrac{100 - Ash}{100 - Ash_{desired}}, & if\ Ash > Ash_{desired} \end{cases} \qquad (۲)$$

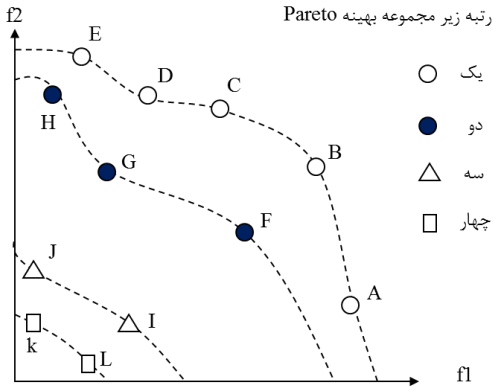
که در آن Ash، خاکستر به دست آمده از مدار و $Ash_{desired}$، خاکستر مطلوب است. این شاخص مقداری بین ۰ تا ۱ دارد و با نزدیک شدن خاکستر کنسانتره به خاکستر مطلوب مقدار شاخص به عدد یک نزدیک شده و با دور شدن خاکستر کنسانتره از مقدار مطلوب (چه بیشتر و چه کمتر) مقدار شاخص به صفر نزدیک می‌شود [۴].

با توجه به دو هدف مذکور، برای درک مفهوم بهینه Pareto در شکل (۲) یک مجموعه ۱۲ تایی از راه‌حل‌های فضای پاسخ نشان داده‌شده است. هر جواب در فضای پاسخ، با توجه به مقادیر f_1 و f_2 در یک زیرمجموعه از رتبه‌های بهینه Pareto قرار می‌گیرد. جواب‌های موجود در زیرمجموعه بهینه Pareto با رتبه یک، شامل اعضایی می‌باشند که هیچ یک از اعضای موجود در فضای پاسخ نتوانسته‌اند هر دو هدف f_1 و f_2 آن‌ها را مغلوب کنند. اعضای این مجموعه نیز نسبت به هم بی‌تفاوتند و حالت مغلوب‌کنندگی یا مغلوب‌شوندگی ندارند. برای مثال در شکل (۲)، هیچ عضوی از فضای پاسخ نمی‌تواند هر دو پارامتر f_1 و f_2 مربوط به اعضاء A، B، C، D و E را مغلوب کند و خود اعضاء نیز نسبت به هم بی‌تفاوتند. در نتیجه این اعضا در زیرمجموعه بهینه Pareto با رتبه یک قرار می‌گیرند. حداقل یک عضو در این زیرمجموعه وجود دارد که مقادیر هر دو پارامتر f_1 و f_2 آن عضو از اعضای F، G و H بیشتر باشد. برای مثال عضو B در بهینه Pareto رتبه یک، عضو F را به طور کامل مغلوب می‌کند. به همین ترتیب عضو G را سه عضو D، C و B و عضو H را دو عضو D و E به طور کامل مغلوب می‌کنند. در نتیجه سه عضو F، G و H در زیرمجموعه بهینه Pareto با رتبه دو قرار می‌گیرند. اما هیچ یک از اعضای دیگر شامل عضوهای I، J، K و L نمی‌توانند این پاسخ‌ها را به طور کامل مغلوب کنند. به این ترتیب همه اعضای موجود در فضای پاسخ رتبه‌بندی می‌شوند و در یک زیرمجموعه از بهینه Pareto قرار می‌گیرند[۱۰][۱۱].

۱-۴-۳- مراحل کلی اجرای روش بهینه‌سازی Pareto

مراحل اجرای الگوریتم وراثتی برای حل مسائل چندهدفه با روش بهینه‌سازی Pareto نسبت به روال کلی الگوریتم

وراثتی برای حل مسائل تک‌هدفه دارای چند تفاوت اساسی است.



شکل۲: ناحیه جواب‌های رتبه‌بندی شده Pareto (f1 و f2 شایستگی هر راه حل به ترتیب در هدف اول و هدف دوم است.)

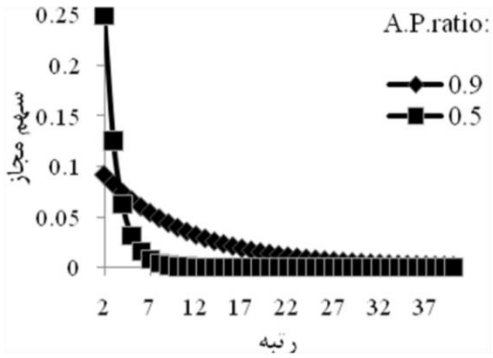
در هنگام حل مسائل چندهدفه با روش بهینه‌سازی Pareto به هر عضو از جمعیت با توجه به مقدار شایستگی‌هایی که برای هر هدف به دست آورده است، یک رتبه‌ی Pareto و یک شاخص برای میزان پراکندگی شایستگی‌هایش نسبت به بقیه اعضای جمعیت نسبت داده می‌شود. سپس در مرحله انتخاب والدین برای تولید مثل و انتخاب نسل بعدی، این دو شاخص برای رقابت با سایر اعضای جمعیت در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. مراحل کلی اجرای الگوریتم بهینه‌سازی مسائل چندهدفه به شرح زیر است:

۱- تعیین مقادیر اولیه پارامترهای الگوریتم وراثتی

علاوه بر پارامترهای اولیه الگوریتم وراثتی تک‌هدفه، در الگوریتم وراثتی چندهدفه باید، سهم مجاز حضور اعضای هر یک از زیرمجموعه‌های بهینه Pareto در نسل بعد با توجه به دو پارامتر تعیین شود. پارامتر اول (Pareto fraction) سهم مجاز حضور اعضا در زیرمجموعه بهینه Pareto با رتبه یک است که مقدار معمول آن ۰/۳۵ است. پارامتر دوم A.P.ratio (Allowed population ratio) است. با استفاده از این پارامتر، می‌توان سهم مجاز حضور اعضای زیرمجموعه‌های بهینه Pareto با رتبه‌های بیشتر از یک را در نسل‌های بعد به دست آورد (رابطه ۳). محدوده تغییر این پارامتر بین صفر و یک است. هر چه مقدار A.P.ratio بیشتر باشد، احتمال حضور کروموزوم‌های ضعیف‌تر با رتبه Pareto بیشتر در نسل‌های بعد افزایش می‌یابد و در مقادیر کمتر A.P.ratio احتمال حضور کروموزوم‌ها با رتبه Pareto کمتر، افزایش می‌یابد و شانس حضور کروموزوم‌های ضعیف‌تر کاهش می‌یابد (شکل ۳).

$$P_{allowed}^{(Rank)} = \frac{A.P.ratio^{(Rank-1)} \times (1 - A.P.ratio)}{(1 - A.P.ratio^{TotalRank})} \qquad (۳)$$

که در آن $P_{allowed}^{(Rank)}$ سهم حضور اعضای زیرمجموعه‌های بهینه Pareto با رتبه بیشتر از یک، A.P.ratio نرخ مجاز جمعیت، Rank رتبه‌ی Pareto و TotalRank تعداد زیرمجموعه‌های بهینه Pareto موجود است.



شکل۳: سهم مجاز حضور اعضای جمعیت با رتبه Pareto بیشتر از یک، با توجه به مقدار پارامتر A.P.ratio

در آغاز اجرای الگوریتم، پارامتر A.P.ratio با عدد بزرگ (۰/۹۵) مقداردهی می‌شود تا امکان حضور کروموزوم‌های ضعیف‌تر (رتبه Pareto بیشتر) در نسل بعد افزایش یابد. به این ترتیب تمام فضای پاسخ توسط الگوریتم وراثتی بررسی خواهد شد. با تغییر خطی مقدار A.P.ratio به سمت مقادیر کمتر در طول اجرای الگوریتم، به تدریج می‌توان بهره‌وری الگوریتم را افزایش داد و شانس حضور کروموزوم‌های ضعیف‌تر در نسل بعد کاهش پیدا می‌کند. بعد از مشخص شدن درصد مجاز اعضای جمعیت برای هر رتبه، این مقادیر نرمال می‌شوند. مقادیر نرمال شده در تعداد اعضای جمعیت اولیه ضرب می‌شوند و تعداد مجاز عضوها برای هر رتبه به دست می‌آید.

۲- رتبه‌بندی Pareto

بر اساس مقادیر پارامترهای تابع هدف، به اعضای جمعیت رتبه Pareto اختصاص داده می‌شود. به این صورت که ابتدا به تمام کروموزوم‌های مغلوب نشده جمعیت با توجه به مقدار شایستگی آن‌ها، رتبه یک تخصیص داده‌شده و به طور موقت از جمعیت خارج می‌شوند. سپس در اعضای باقیمانده، بخش مغلوب نشده جمعیت مشخص‌شده و به آن‌ها رتبه ۲ نسبت داده می‌شود و مجدداً از جمعیت خارج می‌شوند. این عمل به همین ترتیب تا رتبه‌دار شدن تمام اعضای جمعیت ادامه می‌یابد[۹][۱۰][۱۱].

۳- تعیین فاصله برای اعضای هم‌رتبه در زیرمجموعه‌های بهینه Pareto

بعد از رتبه‌بندی کردن اعضای جمعیت، فاصله هر عضو نسبت به اعضای هم رتبه‌اش تعیین می‌شود. برای این کار اعضای هم‌رتبه بر اساس مقدار شایستگی خود در هدف اول از کوچک به بزرگ مرتب شده و فاصله هر عضو به صورت اختلاف شایستگی عضو بعدی و قبلی آن عضو محاسبه می‌شود. به بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین عضو نیز مقدار فاصله بی‌نهایت اختصاص داده می‌شود. این کار برای مقدار شایستگی اعضا در هدف‌های بعدی نیز انجام می‌شود. در انتها فاصله هر عضو نسبت به اعضای هم‌رتبه‌اش از جمع همه فاصله‌های محاسبه‌شده به دست می‌آید [۱۱].

۴- عملگر انتخاب والدین

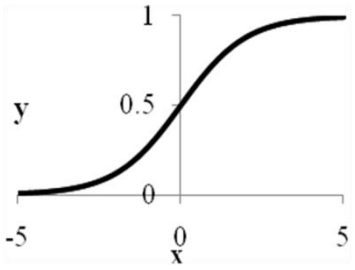
یکی از روش‌های عملگر انتخاب در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، روش مسابقه است. معیار انتخاب در این روش، رتبه‌ی Pareto و مقدار فاصله‌ی اعضا است. به این ترتیب که به تعداد اندازه مسابقه، به صورت اتفاقی از اعضا جمعیت انتخاب می‌شود [۱۱]. در آغاز اجرای الگوریتم هر عضو که رتبه بالاتری داشته باشد شانس بیشتری در برنده شدن دارد و در صورتی که رتبه اعضا یکسان باشد، برنده مسابقه عضوی است که فاصله بیشتری از اکثریت اعضای هم رتبه خود داشته باشد. به تدریج در طول اجرای الگوریتم، شانس برنده شدن اعضا با رتبه کمتر Pareto افزایش می‌یابد. به این ترتیب در نسل‌های ابتدایی قدرت کاوش الگوریتم بالا خواهد بود، زیرا شانس حضور کروموزوم‌هایی که دارای رتبه Pareto بالایی هستند بیشتر است. اما در نسل‌های انتهایی شانس این کروموزوم‌ها کاهش داده می‌شود تا بهره‌وری الگوریتم افزایش پیدا کند.

برای تنظیم نحوه انتخاب در نسل‌های متفاوت الگوریتم از یک تابع سیگموئید استفاده شد (رابطه ۴). مقادیر ورودی تابع سیگموئید (x) در بازه [-5,5] به صورت خطی نسبت به دوره اجرای الگوریتم تغییر داده شد (شکل ۴). اگر عدد تصادفی انتخاب‌شده از مقدار تابع سیگموئید کمتر باشد، رتبه‌ی کمتر برنده مسابقه می‌شود. در غیر این صورت رتبه بالاتر برنده خواهد شد.

$$y = \frac{1}{(1 + \exp(-x))} \qquad (۴)$$

۵- عملگرهای تولید مثل (همبری و جهش)

بعد از این که عملگر برش و جهش روی جمعیت اولیه اجرا شد، جمعیت جدید به دست می‌آید. جمعیت جدید به اعضای جمعیت اولیه (جمعیت مرحله قبل) اضافه شده و از این به بعد مراحل اجرای الگوریتم با جمعیت بزرگ‌تر که دو برابر اندازه جمعیت اولیه است، ادامه پیدا می‌کند. بعد از این که مقدار تابع شایستگی چندهدفه برای کل جمعیت محاسبه شد، رتبه‌بندی Pareto و فاصله اعضای هم‌رتبه نیز تعیین می‌شود[۹][۱۱].



شکل۴: نمودار تابع سیگموئید

۶- کاهش اندازه جمعیت جدید به اندازه جمعیت اولیه

برای کاهش اعضای جمعیت، در مرحله اول با توجه به مقادیر پارامترهای Pareto fraction و A.P.ratio، سهم مجاز اعضای جمعیت برای هر رتبه مشخص می‌شود. بعد از نرمال کردن مقادیر سهم مجاز، از حاصل‌ضرب هر سهم در اندازه جمعیت اولیه، تعداد مجاز اعضای جمعیت در رتبه‌های مختلف به دست می‌آید. سپس از بین تعداد مجاز عضوها برای هر یک از زیرمجموعه‌های بهینه Pareto و تعداد اعضای موجود در آن زیرمجموعه، هر کدام مقدار کمتری داشته باشد، به عنوان تعداد اعضای آن زیرمجموعه انتخاب می‌شود که در نسل بعد حضور خواهند داشت. اگر تعداد عضوهای موجود از یک رتبه کمتر از تعداد مجاز برای آن رتبه باشد، اختلاف بین تعداد مجاز و تعداد موجود به تعداد مجاز اعضای رتبه بعدی اضافه خواهد شد. در صورتی که برای هر رتبه، تعداد اعضای موجود بیشتر از مقدار مجاز باشد، عضوهای با مقدار فاصله کوچک‌تر حذف می‌شوند تا تعداد مجاز برآورده شود [۱۱].

بعد از انجام مرحله اول کاهش اعضای جمعیت، اگر هنوز تعداد اعضای جمعیت بیشتر از اندازه جمعیت اولیه بود، اعضای با رتبه‌ی Pareto بیشتر و فاصله کمتر حذف می‌شود. به این ترتیب جمعیت به اندازه جمعیت اولیه کاهش پیدا می‌کند [۱۱].

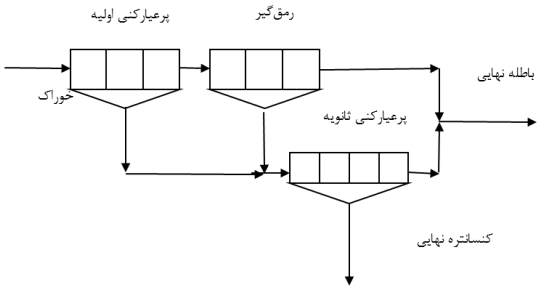
۷- شاخص ارزیابی و توقف الگوریتم

در این قسمت برای ادامه الگوریتم وراثتی تصمیم‌گیری می‌شود. معیارهای مختلفی را می‌توان برای ادامه الگوریتم در نظر گرفت. تعداد نسل یکی از معیارهای معمول است. کارایی الگوریتم نیز می‌تواند یکی دیگر از معیارهای توقف الگوریتم

وراثتی باشد. برای مثال اگر مقدار اختلاف بین شایستگی بهترین کروموزوم با متوسط شایستگی جمعیت برای همه هدف‌ها در چند نسل متوالی از یک شاخص که توسط کاربر تعریف می‌شود کمتر باشد، روال اجرای الگوریتم متوقف خواهد شد.

۱-۵- مدار فلوتاسیون اولیه کارخانه زغالشویی زرند

مدار فلوتاسیون اولیه کارخانه زغالشویی زرند در شکل (۵) نشان داده‌شده است. این مدار شامل دو مرحله پرعیارکنی اولیه و پرعیارکنی ثانویه است. پرعیارکنی اولیه دارای دو سه سلولی است که توسط دریچه‌ای به هم متصل هستند. کل خوراک ورودی به سه سلولی اول وارد می‌شود. باطله سه سلولی اول به سه سلولی دوم وارد می‌شود و باطله پرعیارکنی ثانویه نیز به همراه باطله سه سلولی دوم پرعیارکنی اولیه به عنوان باطله نهایی از مدار خارج می‌شود. کنسانتره پرعیارکنی اولیه به پرعیارکنی ثانویه با چهار سلول وارد شده و کنسانتره پرعیارکنی ثانویه، کنسانتره نهایی مدار را تشکیل می‌دهد[۱۲]. مدل‌سازی سینتیکی این مدار مشخص کرد که خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان کلی مدار به ترتیب ۹/۱ درصد و ۵۷/۶ درصد است. به علاوه محتوی خاکستر باطله نهایی ۴۵/۶ درصد با مقدار ۵/۱ تن بر ساعت به دست آمد.



شکل۵: مدار فلوتاسیون اولیه کارخانه زغالشویی زرند

۲- روش تحقیق

۲-۱- بهینه‌سازی مدار فلوتاسیون کارخانه با روش مجموع وزن‌دار

ابتدا قابلیت روش مجموع وزن‌دار در یافتن مدار فلوتاسیون بهینه، مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ۸ اجرا از الگوریتم وراثتی با ترکیب‌های مختلف از نسبت ضرایب وزنی برای دو هدف راندمان و شاخص خاکستر به‌کار گرفته شد. ترکیب‌های وزنی به‌کار گرفته‌شده در جدول (۱) خلاصه شده است.

برای اطمینان از پایداری نتایج الگوریتم وراثتی، هر ترکیب وزنی نیز ۳۰ بار تکرار گردید. مقدار اولیه‌ی پارامترهای الگوریتم وراثتی برای همه‌ی حالت‌ها در جدول (۲) بیان شده است. توصیف کامل این پارامترها توسط محققین ارائه‌شده است[۴].

جدول۱: ترکیب وزن‌های نسبت داده‌شده در حل مسئله مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند

شماره اجرای الگوریتم	وزن نسبت داده‌شده به شاخص خاکستر	راندمان
۱	۱	۰
۲	۰/۹۹۹	۰/۰۰۱
۳	۰/۹۹	۰/۰۱
۴	۰/۹	۰/۱
۵	۰/۸	۰/۲
۶	۰/۷۵	۰/۲۵
۷	۰/۷	۰/۳
۸	۰	۱

۲-۲- بهینه‌سازی مدار فلوتاسیون کارخانه با روش Pareto

به منظور بررسی قابلیت روش Pareto در بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند، روال اجرای الگوریتم وراثتی متناسب با مراحل بهینه‌سازی با روش Pareto تغییر داده شد. سپس الگوریتم وراثتی با شرایط اولیه ارائه‌شده در جدول (۲) به‌کار گرفته شد تا ترکیب بهینه برای مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند مشخص شود. برای بررسی میزان پایداری پاسخ‌های الگوریتم وراثتی، نتایج حاصل از ۳۰ بار اجرای الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج

۳-۱- مدارهای پیشنهادی با روش مجموع وزن‌دار

در جدول (۳) کارایی بهترین مدار به دست آمده در هر اجرای الگوریتم با روش مجموع وزن‌دار ارائه‌شده است. خاکستر کنسانتره در اجراهای ۳، ۴ و ۵ به مقدار خاکستر مطلوب (۱۰/۸ درصد) نزدیک‌تر است و راندمان به دست آمده در این اجراها بهتر از مدار اولیه کارخانه است. باید توجه داشت که مدارهای به دست آمده در اجراهای ۶، ۷ و ۸ علی‌رغم راندمان بسیار بالا، فاقد کنسانتره‌ای با کیفیت مناسب از نظر محتوی خاکستر هستند و در نتیجه نتایج آن‌ها قابل قبول نیست.

جدول۲: مقادیر پارامترهای اولیه‌ی الگوریتم وراثتی

پارامترهای الگوریتم	مقدار
تعداد جمعیت اولیه	۱۰۰
تعداد متغیرها	۲۷
طول هر متغیر با دقت ۰/۰۰۲ (بیت)	۹
نرخ برش	۰/۷
کمترین نرخ جهش	۰/۰۰۱
بیش‌ترین نرخ جهش	۰/۱
نرخ جهش	در هر نسل متغیر است.
شرط توقف (تعداد نسل‌ها)	۱۰۰۰

جدول۳: کارایی متالورژیکی مدارهای به دست آمده از بهینه‌سازی با روش مجموع وزن‌دار

شماره اجرای الگوریتم	راندمان (٪)	محتوی خاکستر کنسانتره (٪)
۱	۵۲/۵	۱۰/۵
۲	۶۱/۳	۱۱/۲
۳	۶۴/۸	۱۰/۸
۴	۶۵/۲	۱۰/۹
۵	۶۵/۸	۱۱
۶	۷۴/۴	۱۳/۹
۷	۷۷/۳	۱۵/۱
۸	۷۷/۲	۱۵/۲

۳-۲- مدارهای پیشنهادی با روش بهینه Pareto

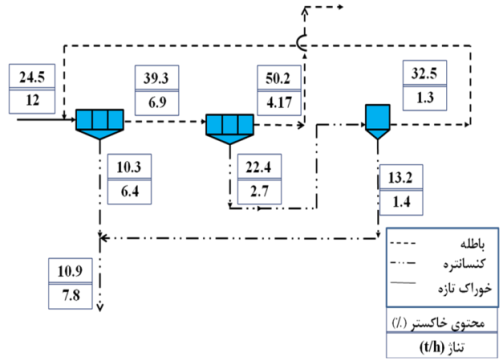
کارایی بهترین مدارهای به دست آمده از روش بهینه‌سازی Pareto در جدول (۴) ارائه‌شده است. در میان مدارهای به دست آمده از روش Pareto مدارهای شماره ۱، ۵ و ۸ توسط روش مجموع وزن‌دار نیز پیشنهاد شده‌اند (مدارهای ۳، ۴ و ۵ در روش مجموع وزن‌دار).

۳-۳- بهترین مدار سه مرحله‌ای پیشنهادی

ترکیب بهترین مدار پیشنهادی با روش بهینه‌سازی چند هدفه، در شکل (۶) نشان داده‌شده است. در این مدار خوراک ورودی به سه سلولی پرعیارکنی اولیه وارد می‌شود. باطله پرعیارکنی اولیه به سه سلولی رمق‌گیر و کنسانتره رمق‌گیر به تک‌سلولی پرعیارکنی ثانویه رمق‌گیر وارد می‌شود. باطله رمق‌گیر به اول مدار بازمی‌گردد و باطله پرعیارکنی ثانویه رمق‌گیر به عنوان باطله نهایی، از مدار خارج می‌شود. کنسانتره پرعیارکنی اولیه نیز به همراه کنسانتره پرعیارکنی ثانویه رمق‌گیر، کنسانتره نهایی مدار را تشکیل می‌دهد. در مدل‌سازی سینتیکی این مدار پیشنهادی مشخص شد که محتوی خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان به ترتیب ۱۰/۹ و ۶۵/۲ است. مقدار باطله نهایی مدار ۴/۲ تن بر ساعت با محتوی خاکستر ۵۰/۲ درصد محاسبه شد.

جدول۴: مدارهای پیشنهادی با روش بهینه Pareto

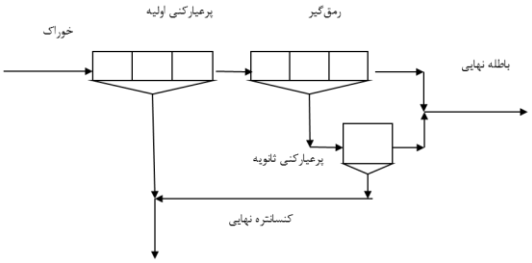
شماره مدار	راندمان (٪)	محتوی خاکستر کنسانتره(٪)
۱	۶۵/۸	۱۱
۲	۶۵/۸	۱۱/۱
۳	۶۵/۵	۱۱
۴	۶۵/۳	۱۱/۱
۵	۶۵/۲	۱۰/۹
۶	۶۵/۱	۱۱
۷	۶۵	۱۱/۱
۸	۶۴/۸	۱۰/۸



شکل۶: ترکیب مدار فلوتاسیون سه مرحله‌ای پیشنهادی با روش بهینه‌سازی چندهدفه

۳-۴- اعمال نتیجه بهینه‌سازی ترکیب مدار

مدار پیشنهادی که در شکل (۶) نشان داده شد، در کارخانه اجرا شد. با توجه به شرایط موجود در کارخانه امکان بازگرداندن باطله تک سلولی مرحله سوم به اول مدار فراهم نشد و باطله این مرحله به همراه باطله سه مرحله‌ای پرعیارکنی ثانویه، به عنوان باطله نهایی از مدار خارج می‌شود (شکل ۷)[۸][۱۲].



شکل۷: مدار فلوتاسیون جدید کارخانه زغالشویی زرند

مدل‌سازی سینتیکی مدار کنونی نشان داد که محتوی

خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان به ترتیب، ۱۱/۱ درصد و ۶۴/۳ درصد است. همچنین محتوی خاکستر باطله نهایی ۴۸/۷ درصد با مقدار ۴/۳ تن بر ساعت به دست آمد. راندمان این مدار نسبت به مدار اولیه کارخانه، ۶/۷ درصد افزایش یافته است.

۵-۳- مقایسه روش‌های بهینه‌سازی مجموع وزن‌دار و بهینه Pareto

مقادیر متوسط و انحراف معیار نسبی محتوی خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان در دو روش مجموع وزن‌دار و Pareto با شرایط اولیه یکسان، در جدول (۵) ارائه‌شده است. مقدار انحراف معیار نسبی محتوی خاکستر و راندمان در روش مجموع وزن‌دار برابر با ۰/۱ به دست آمد. درحالی‌که انحراف معیار نسبی محتوی خاکستر و راندمان برای ۳۰ بار اجرا با روش بهینه‌سازی Pareto برابر با ۰/۰۱ بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج روش Pareto پایدارتر از نتایج روش مجموع وزن‌دار است. همچنین در روش مجموع وزن‌دار با هر بار اجرای الگوریتم تنها یکی از مدارهای پیشنهادی به دست می‌آید و باید الگوریتم به ازای ضریب‌های مختلف وزنی اجرا شود تا تعدادی از مدارهای مطلوب حاصل شود. اما در روش Pareto با یک بار اجرای الگوریتم وراثتی می‌توان به بیشتر مدارهای بهینه رسید. بنابراین نتایج روش بهینه‌سازی Pareto مانند روش مجموع وزن‌دار به مقدار ضرایب وزنی وابسته نیست.

جدول۵: مقایسه پایداری الگوریتم وراثتی در دو روش بهینه Pareto و مجموع وزن‌دار

شاخص آماری	روش بهینه Pareto		روش مجموع وزن‌دار	
	راندمان (٪)	محتوی خاکستر کنسانتره(٪)	راندمان (٪)	محتوی خاکستر کنسانتره(٪)
میانگین	۶۵/۲	۱۱/۰	۷۱/۶	۱۳/۵
انحراف معیار	۰/۴۶	۰/۱۰	۸/۱۰	۲/۰۷
انحراف معیار نسبی	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۱۵

۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم وراثتی هدایت‌شده نشان داد که با تغییر ترکیب مدار فلوتاسیون ضمن حفظ کیفیت کنسانتره نهایی در حد مطلوب (۱۰/۸ درصد) امکان افزایش راندمان از ۵۷/۶ درصد در مدار اولیه کارخانه زرند به ۶۵/۲ درصد در بهترین ترکیب مدار از نظر عملیاتی وجود دارد.

بررسی انحراف معیار نسبی پاسخ‌های دو روش مجموع وزن‌دار و Pareto نشان داد که انحراف معیار نسبی روش مجموع وزن‌دار ۱۰ برابر انحراف معیار نسبی روش Pareto است. در نتیجه پاسخ‌های روش Pareto از پایداری بیشتری برخوردار است.

۵- تقدیر و تشکر

از آقایان مهندس امیر حاجی‌زاده، مهندس غلام عباس پارساپور و مهندس مظفری به‌دلیل زحماتی که در مدل‌سازی مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند کشیده‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- مراجع

[1]- Green, J.C.A., 1984, The Optimization of Flotation Networks, Int. J. Miner. Process., Vol. 13, pp. 83-103.

[2]- Dey, A.K., Kapur, P.C., Mehrotra, S.P., 1989, A Search Strategy for Optimization of Flotation Circuits, Int. J. Miner. Process., Vol. 26, pp. 73-93.

[۳]- نقوی، ه.، ۱۳۸۷، ***معرفی الگوریتم ژنتیک و کاربرد آن در بهینه‌سازی فرآیندهای فرآوری مواد***، پروژه کارشناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[4]- Ghobadi, P.,Yahyaei, M., Banisi, S., 2011, Optimisation of the Performance of Flotation Circuits Using a Genetic Algorithm Oriented by Process-based Rules, International Journal of Mineral Processing, 98, pp.174-181.

[5]- Fichura, M.A., Chudacek, M.W., 1992, Batch Cell Flotation Models- A Review, Min. Eng., Vol.5, pp. 41-55.

[6]- Arbiter, N., Harris, C.C., 1962, Flotation Kinetics. In: Fuerstenau, D.W. (Ed.), Froth Flotation, 50th Anniversary, AIME, New York, pp.215-246.

[7]- Lynch, A.J., Johnson, N.W.,Manlaping, E.V., Thorne, C.G., 1981, Mineral and Coal Flotation Circuits, Elsevier Scientific, New York, pp.56-96.

[۸]- حاجی‌زاده، الف.، ۱۳۸۹، ***مدل‌سازی مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند***، پروژه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[9]- Censor, Y., 1977, Pareto Optimality in Multiobjective Problems, Appl. Math. Optimiz., Vol. 4, pp 41–59.

[۱۰]- نظام‌آبادی، ح.، ۱۳۸۹، ***الگوریتم ژنتیک***، انتشارات دانشگاه شهید باهنر، کرمان، چاپ اول.

[11]- Matlab Users Manual, copyright 2009.

[۱۲]- اسکندری سیاه‌کوهی، م.، ۱۳۸۱، ***افزایش کارایی مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرند***، پروژه کارشناسی ارشد.