

مدار بهینه فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرنند بر مبنای روش مجموع وزن دار با استفاده از الگوریتم وراثتی هدایت شده

درنا پیروزان^۱، محسن یحیایی^۲، صمد بنیسی^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ pirouzan@kmmpc.ir

۲- دکتری فرآوری مواد معدنی، مرکز تحقیقات فرآوری مواد مهندس کاشی گر، کرمان؛ yahyaei@kmmpc.ir

۳- استاد بخش مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ banisi@mail.uk.ac.ir

(دریافت ۲۹ تیر ۱۳۹۳، پذیرش ۷ مهر ۱۳۹۳)

چکیده

جستجوی ترکیب مدار فلوتاسیون بهینه برای دستیابی به اهداف متالورژیکی مطلوب انجام می‌شود. در مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی پارامترهای متالورژیکی مانند راندمان و محتوای خاکستر محصول اهداف مورد نظر برای رسیدن به ترکیب مدار بهینه می‌باشند. برای محاسبه پارامترهای متالورژیکی هر ترکیب ممکن از مدار فلوتاسیون نیاز به مدل‌سازی است. با توجه به اهداف عملیات، بعضی از پارامترهای متالورژیکی نسبت به دیگر پارامترها مهم‌تر هستند. برای اجرایی کردن این امر، با به‌کارگیری روش مجموع وزن دار و نسبت دادن وزن بیشتر به پارامتر مهم‌تر، ترکیب مدار بهینه‌ای یافت می‌شود که نتیجه آن دستیابی به محصولی با مشخصات مورد نظر است. در کارخانه زغالشویی زرنند برای محاسبه پارامترهای متالورژیکی هر ترکیب مدار از مدل سینتیک مرتبه اول استفاده شد. چون با تغییر اندازه ذرات زغالسنگ، نرخ شناوری آن‌ها نیز تغییر می‌کند این شاخص به عنوان مبنایی برای تفکیک خوراک به گونه‌های مختلف در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج با مقادیر اندازه گیری شده نشان داد که خطای متوسط پیش‌بینی راندمان و محتوای خاکستر کنسانتره توسط مدل به ترتیب $4/2 \pm$ و $0/75 \pm$ درصد می‌باشد. با به‌کارگیری روش مجموع وزن دار، همه ترکیب وزن‌های ممکن نسبت داده شده به پارامترهای متالورژیکی، ارزیابی شد. از میان سه ترکیب مدار فلوتاسیون پیشنهادی، ترکیبی که با اختصاص دادن وزن‌های ۹/۰ و ۱/۰ به ترتیب به شاخص محتوای خاکستر و راندمان به‌دست آمد، به دلیل امکان‌پذیر بودن در کارخانه به اجرا گذاشته شد که نتیجه آن دستیابی به محصولی با کیفیت قابل قبول (محتوای خاکستر کنسانتره کمتر از ۱۱ درصد) به همراه افزایش راندمان از ۵۷/۶ درصد در مدار اولیه به ۶۵/۸ درصد بود.

کلمات کلیدی

فلوتاسیون، مدل‌سازی سینتیک، بهینه‌سازی، روش مجموع وزن دار

۱- مقدمه

بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون برای دستیابی به محصولی با کیفیت و کمیت مطلوب از دیر باز بسیار مورد توجه بوده است [۱،۲]. طراحی و بهینه‌سازی مدارهای فلوتاسیون با انجام آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه صنعتی و یا با روش‌های ریاضی کلاسیک [۳-۵] به علت هزینه‌بر بودن و زمان‌بر بودن کارایی لازم را ندارند. با پیشرفت روش‌های بهینه‌سازی محاسباتی کارا مانند الگوریتم وراثتی [۶] می‌توان در حداقل زمان، تمامی ترکیب مدارهای ممکن فلوتاسیون را با صرف کمترین هزینه، بررسی کرد و از میان آن‌ها چیدمان بهینه مدار فلوتاسیون را برگزید [۷، ۸]. Cisternas و همکاران [۸] از الگوریتم ژنتیک برای طراحی مدار فلوتاسیون بهینه استفاده کردند. در این تحقیق تمامی توابع هدف ممکن در طراحی مدار فلوتاسیون، به‌طور انفرادی در اجراهای جداگانه ارزیابی شد. توابع هدف مختلف به منظور بررسی تأثیر آن‌ها بر ساختار بهینه مدار فلوتاسیون، طراحی تجهیزات و شرایط عملیاتی ساخته شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که تأثیر بر ترکیب مدار فلوتاسیون نسبت به شرایط عملیاتی در توابع هدف مختلف بارزتر است و از میان توابع هدف مورد بررسی، تابع حداکثر سود یا برای ساده‌تر کردن تابع ارزش خالص معیاری برای طراحی ترکیب مدار بهینه در نظر گرفته شد [۸].

اما بهینه‌سازی بیشتر مسائلی که امروزه با آن روبرو هستیم برای برآورده کردن چند هدف به‌طور همزمان انجام می‌شود، از این رو این مسائل به مسائل چندهدفه معروفند. فضای جستجوی در این نوع مسائل بسیار پیچیده است [۶، ۹]. یکی از روش‌های متداول در حل مسائل چندهدفه با استفاده از الگوریتم وراثتی، روش مجموع وزن‌دار است که با استفاده از این روش، مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با ایجاد یک تابع از اهداف مورد نظر، به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه تبدیل می‌شود. در این روش به هر هدف، وزنی نسبت داده می‌شود. در صورتی که از میان اهداف مورد نظر، اهمیت هدفی بیشتر از سایر آن‌ها باشد با تخصیص مقدار وزن بیشتر به آن هدف، می‌توان به جواب بهینه‌ای رسید که در میان دیگر جواب‌های ممکن به هدف ارجح، نزدیک‌تر است. با جمع هدف‌های وزن‌دار شده تابع برازندگی (شایستگی) ساخته می‌شود و در بهینه‌سازی با الگوریتم وراثتی مبنایی برای مقایسه جواب‌ها (۷) می‌شود.

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

که در آن، f_i میزان شایستگی برای هدف i ام و w_i وزن مربوط به هدف i ام است. به‌طور معمول این وزن‌ها ثابت هستند در این روش، اغلب از وزن‌های نرمال شده (مجموع تمام وزن‌ها برابر با یک است) استفاده می‌شود و در هر اجرا یک جواب به‌دست می‌آید [۶، ۷].

بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون به منظور رسیدن با هدف دستیابی به پارامترهای متالورژیکی مناسب (عیار محصول، راندمان و دیگر موارد) انجام می‌شود. برای محاسبه‌ی کارایی متالورژیکی مدار باید مقادیر تمام جریان‌ها به همراه محتوی خاکستر آن‌ها مشخص باشد. به اجرا گذاشتن هر ترکیب مدار برای دستیابی به مقدار بازیابی و عیار محصول امری غیر ممکن است اما با انجام مدل‌سازی مناسب می‌توان مقادیر پارامترهای متالورژیکی هر ترکیب از مدار فلوتاسیون را تخمین زد [۷، ۱۰ و ۱۱].

در این تحقیق، به‌منظور یافتن ترکیب بهینه مدار فلوتاسیون کارخانه زغالسویی زرنده با استفاده از الگوریتم وراثتی، روش مجموع وزن‌دار به‌کار گرفته شد و تأثیر وزن‌دار کردن دو هدف محتوای خاکستر محصول (۱۰/۸ درصد) و مقدار بیشینه راندمان بر جواب‌های ارائه شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش‌های انجام شده این گروه در خصوص الگوریتم وراثتی با روش بهینه Pareto و کاربرد آن در بهینه‌سازی چندهدفه ترکیب مدار فلوتاسیون در جای دیگر آمده است [۱۲-۱۴]. در پژوهش حاضر، مزیت استفاده از روش مجموع وزن‌دار در بهینه‌سازی به همراه ارائه کامل نتایج کاربردی آن برای مطالعه موردی بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون کارخانه زرنده آمده است. در این مقاله سعی بر آن است تا با ارائه این نتایج خوانندگان بتوانند از نحوه استفاده از روش مجموع وزن‌دار در بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون مطلع شوند. به علت اهمیت مدل‌سازی و ضرورت انجام آن، نحوه بکارگیری مدل‌سازی سینتیک مرتبه اول مدار فلوتاسیون برای محاسبه پارامترهای متالورژیکی نیز بررسی شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل‌سازی مدار فلوتاسیون

برای مدل‌سازی فلوتاسیون از مدل سینتیکی مرتبه اول با ثابت نرخ توزیع شده استفاده شد. از آنجایی که پارامترهای مدل سینتیکی در صنعت قابل اندازه‌گیری می‌باشند، با شبیه‌سازی

در مدل‌سازی، هر ترکیب از مدار فلوتاسیون با تعیین متغیرهای ساختاری مشخص می‌شود. به مجموعه ای از مقادیر f_{i0} (سهم سلول i ام از خوراک ورودی)، c_{ij} (کسری از کنسانتره سلول j ام که وارد سلول i ام می‌شود) و t_{ij} (کسری از باطله سلول j ام که وارد سلول i ام می‌شود) پارامترهای ساختاری گفته می‌شود. مقادیر پارامترهای ساختاری بین صفر و یک است [۷، ۲۰].

در جدول ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده در درصد جامد خوراک و کنسانتره در هر یک از مراحل فلوتاسیون در کارخانه زغالشویی زرنند ارائه شده است.

زمان ماند ذرات در پالپ به الگوی اختلاط پالپ بستگی دارد. به منظور اندازه‌گیری زمان ماند در سه مرحله پرعیارکنی اولیه، پرعیارکنی ثانویه و رمق‌گیر، نمک به صورت ردیاب به‌طور لحظه‌ای به ابتدای هر ردیف سلول اضافه شد و غلظت آن در زمان‌های مختلف در خروجی سیستم اندازه‌گیری شد. سپس پارامترهای مدل N-mixer [۲۱] با استفاده از برازش منحنی بدست آمد. نتایج در جدول (۲) خلاصه شده است. در زمان اندازه‌گیری زمان‌های ماند، تناژ ورودی به هر ردیف از مدار ۱۲ تن بر ساعت بود (کل خوراک ورودی به مدار فلوتاسیون ۴۸ تن بر ساعت) [۲۰].

۲-۱-۲- مراحل مدل‌سازی مدار فلوتاسیون

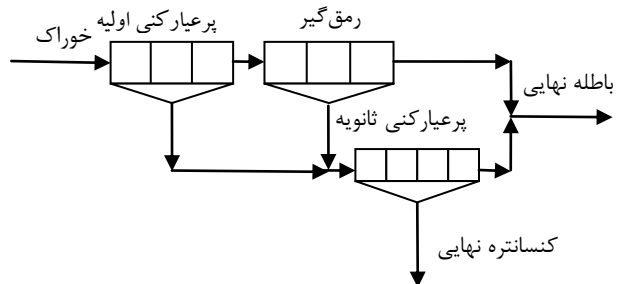
اگر خوراک ورودی به مدار بر اساس ثابت نرخ فلوتاسیون (k)، به M گونه تقسیم شود و مدار شامل N ردیف سلول فلوتاسیون باشد، موازنه جرم مربوط به گونه m ام، در سلول ردیف i ام به صورت رابطه (۲) است.

$$\bar{F}_i^{(m)} = F_i^{(m)} + \sum_{j=1}^N C_j^{(m)} c_{ij} + \sum_{j=1}^N T_j^{(m)} t_{ij} = C_i^{(m)} + T_i^{(m)} \quad (2)$$

که در آن $\bar{F}_i^{(m)}$: کل خوراک ورودی از گونه m ام به ردیف سلول i ام، $F_i^{(m)}$: مقدار گونه m ام در خوراک تازه ورودی به ردیف سلول i ام، $C_j^{(m)}$: کل کنسانتره خروجی از ردیف سلول j ام مربوط به گونه m ام، $T_j^{(m)}$: کل باطله خروجی از ردیف سلول j ام، مربوط به گونه m ام، c_{ij} : سهم سلول i ام از کنسانتره سلول j ام، t_{ij} : سهم سلول i ام از باطله سلول j ام و f_{i0} : سهم سلول i ام از خوراک ورودی است.

سینتیکی مدار فلوتاسیون می‌توان ساختار (نحوه ارتباط جریان‌ها) مناسب فلوتاسیون را پیدا کرد [۱۵-۱۸]. مهم‌ترین پارامترها در مدل‌سازی سینتیکی هر ترکیب از مدار فلوتاسیون، تعداد و مشخصات گونه‌های خوراک، الگوی اختلاط در ردیف‌های فلوتاسیون و تعیین پارامترهای ساختاری است.

مدار فلوتاسیون اولیه کارخانه زغالشویی زرنند در شکل (۱) نشان داده شده است. این مدار شامل دو مرحله پرعیارکنی اولیه و پرعیارکنی ثانویه است. پرعیارکنی اولیه دارای دو واحد سه سلولی است که توسط دریچه‌ای به هم متصل هستند و کل خوراک ورودی به سه سلولی اول وارد می‌شود. از طریق این دریچه، باطله سه سلولی اول به سه سلولی دوم وارد می‌شود. کنسانتره پرعیارکنی اولیه به پرعیارکنی ثانویه با چهار سلول وارد شده و کنسانتره پرعیارکنی ثانویه، کنسانتره نهایی مدار را تشکیل می‌دهد. باطله پرعیارکنی ثانویه نیز به همراه باطله سه سلولی دوم پرعیارکنی اولیه به عنوان باطله نهایی از مدار خارج می‌شود. شایان ذکر است که کل مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرنند شامل چهار ردیف موازی است [۱۹].



شکل ۱: مدار فلوتاسیون اولیه کارخانه زغالشویی زرنند [۱۹]

۲-۱-۱- پارامترهای لازم برای مدل‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون

اساس تقسیم خوراک به گونه‌های مختلف، تفاوت در ثابت سینتیک فلوتاسیون گونه‌ها است [۱۱، ۲۰].

به دلیل نوسان زیاد خصوصیات خوراک ورودی به مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی زرنند، استفاده از یک شاخص ساده برای گونه‌بندی خوراک ضروری بود. به دلیل تفاوت در خصوصیات شناوری ذرات زغال‌سنگ در دامنه‌های ابعادی مختلف، توزیع ابعادی ذرات در دامنه‌های بزرگتر از ۳۰۰ میکرون، بین ۳۰۰ تا ۷۵ میکرون و کمتر از ۷۵ میکرون به‌عنوان مبنای تعیین گونه‌های موجود در خوراک در نظر گرفته شد. به این ترتیب با انجام یک آنالیز سرنندی ساده، سهم هر گونه در خوراک فلوتاسیون قابل تعیین است.

$[T^{(m)}]$ از رابطه ۶، مقدار کنسانتره و باطله خروجی از مدار برای هر گونه از روابط ۷ و ۸ قابل محاسبه است.

$$C_0 = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N c_{0j} g_j^{(m)} T_j^{(m)} \quad (7)$$

$$T_0 = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N t_{0j} T_j^{(m)} \quad (8)$$

اگر $W^{(m)}$ جزء جرمی ماده با ارزش در گونه m ام باشد و $F^{(m)}$ مقدار گونه m ام در خوراک تازه باشد، مقدار ماده با ارزش در خوراک تازه ورودی به مدار (M_f) و کنسانتره (M_c) به ترتیب از روابط ۹ و ۱۰ به دست می‌آید.

$$M_f = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N W^{(m)} F_j^{(m)} \quad (9)$$

$$M_c = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N W^{(m)} c_{0j} g_j^{(m)} T_j^{(m)} \quad (10)$$

در نتیجه عیار کنسانتره (G) و بازیابی مدار (R) با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$G = \frac{M_c}{C_0} \times 100 \quad (11)$$

$$R = \frac{M_c}{M_f} \times 100 \quad (12)$$

غنی‌شدگی با توجه به الگوی اختلاط در ردیف سلول‌های فلوتاسیون، تعریف می‌شود. برای مثال اگر ردیف i ام معادل Z_i ظرف مخلوط کامل با زمان ماند τ_i و یک ظرف پیستونی با زمان ماند $\tau_{pf,i}$ باشد، میزان هدرروی گونه m ام با ثابت سینتیک $k^{(m)}$ از رابطه ۱۳ قابل محاسبه است.

$$T_i^{(m)} = \frac{e^{k^{(m)} \tau_{pf,i}} F_i^{(m)}}{(1+k^{(m)} \tau_i)^{Z_i}} \quad (13)$$

رابطه ۳ را می‌توان به صورت رابطه ۱۴ بازنویسی کرد.

$$g_i^{(m)} = \frac{F_i^{(m)} - T_i^{(m)}}{T_i^{(m)}} \quad (14)$$

با جایگذاری رابطه ۱۳ در رابطه ۱۴ خواهیم داشت.

$$g_i^{(m)} = \frac{(1+k^{(m)} \tau_i)^{Z_i} - 1}{e^{k^{(m)} \tau_{pf,i}}} \quad (15)$$

با استفاده از اطلاعات اولیه مربوط به خوراک و مشخص کردن پارامترهای ساختاری مدار و الگوی اختلاط در هر ردیف سلول، روال مدل‌سازی مدار فلوتاسیون آغاز می‌شود. با توجه به رابطه ۱۵ می‌توان مشاهده کرد که مقدار غنی‌شدگی برای هر گونه در یک ردیف به τ_i ، $\tau_{pf,i}$ و Z_i بستگی دارد و با مشخص شدن این عوامل، مقدار g_i برای همه گونه‌ها قابل محاسبه است. با در نظر گرفتن متغیرهای ساختاری و مقادیر g_i ، مقادیر ماتریس $[T^{(m)}]$ بدست می‌آید. با معلوم شدن مقدار باطله خروجی از هر ردیف سلول، دبی باطله آن ردیف مشخص می‌شود. با توجه به این که زمان ماند در هر ردیف سلول به دبی باطله وابسته است، در صورت تفاوت قابل توجه بین دبی باطله حاصل از مدل‌سازی با

جدول ۱: مقادیر درصد جامد خوراک ورودی و کنسانتره خروجی هر مرحله از ترکیب مدار اولیه فلوتاسیون [۲۰]

درصد جامد		مرحله
خوراک	کنسانتره	
۹/۵	۳۰	سه سلولی اول (پرعیارکنی اولیه)
۶/۵	۹	سه سلولی دوم (رمقگیر)
۹	۲۵	پرعیارکنی ثانویه

جدول ۲: مشخصات توزیع زمان ماند و دبی باطله خروجی هر مرحله از

مدار فلوتاسیون [۲۰]

متغیرهای زمان ماند

مرحله	τ_{pf}^* (min)	τ^{**} (min)	Z***	دبی باطله (m ³ /h)
سه سلولی اول	۰/۴	۲/۴	۲/۶	۸۹
سه سلولی دوم	۰/۷	۳/۰	۳	۶۱
پرعیارکنی ثانویه	۲/۰	۳/۵	۳/۱	۱۵/۵

زمان ماند واکنشگر با جریان پیستونی، **: زمان ماند متوسط واکنشگر کاملاً مخلوط **: تعداد واکنشگر کاملاً مخلوط
عامل غنی‌شدگی ($g_i^{(m)}$) برای گونه m ام در ردیف سلول i ام به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$g_i^{(m)} = \frac{C_i^{(m)}}{T_i^{(m)}} \quad (3)$$

با توجه به اینکه در فرآیند فلوتاسیون برگشت مواد کنسانتره یا باطله خروجی از هر مرحله به همان مرحله منطقی نیست، می‌توان رابطه ۲ را به صورت رابطه ۴ نوشت.

$$F_i^{(m)} = C_i^{(m)} + T_i^{(m)} - \sum_{j=1, j \neq i}^N C_j^{(m)} c_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^N T_j^{(m)} t_{ij} \quad (4)$$

با جایگذاری رابطه ۳ در رابطه ۴، داریم (رابطه ۵).

$$F_i^{(m)} = (g_i^{(m)} + 1) T_i^{(m)} - \sum_{j=1, j \neq i}^N (g_i^{(m)} c_{ij} + t_{ij}) T_j^{(m)} \quad (5)$$

برای ساده‌تر شدن حل معادلات موازنه جرم برای مدارهایی با تعداد زیادی از ردیف سلول‌ها، رابطه ۵ را می‌توان به صورت ماتریسی نوشت (رابطه ۶).

$$[F^{(m)}] = [G^{(m)}] \times [T^{(m)}] \quad (6)$$

که در آن $[F^{(m)}]$ یک بردار $N \times 1$ ، $[G^{(m)}]$ یک ماتریس $N \times N$ و $[T^{(m)}]$ یک بردار $N \times 1$ است. رابطه ۶ باید برای هر گونه نوشته و حل شود. بنابراین برای خوراکی که شامل M گونه باشد باید M معادله ماتریسی نوشته شود. پس از معلوم شدن مقدار ماتریس

شد. برای اطمینان از پایداری نتایج الگوریتم وراثتی، هر ترکیب وزنی نیز ۳۰ بار تکرار گردید. این امر پایداری نتایج را با مطالعه انحراف معیار امکان‌پذیر می‌سازد.

مقدار اولیه‌ی پارامترهای الگوریتم وراثتی برای تمامی حالت‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. متغیرهای مورد بررسی شامل پارامترهای ساختاری ترکیب مدار فلوتاسیون بود. از آنجا که مدار فلوتاسیون مورد بررسی در این تحقیق سه مرحله‌ای است بنابراین ۲۷ پارامتر ساختاری ضروری بود تا ترکیب مدار فلوتاسیون مشخص شود. در جمعیت اولیه برای هر متغیر ۹ بیت تخصیص داده شد که در کل برای ۲۷ متغیر طول هر کروموزوم ۲۴۳ بیت در نظر گرفته شد. در فرآیند تولید مثل، عملگرهای تبادل ژنی و جهشی بر روی هر دو کروموزوم انتخاب شده اعمال شد تا این امکان فراهم شود که تمام فضای جستجو مورد بررسی قرار گیرد. به منظور افزایش قدرت کاوش در نسل‌های ابتدایی مقدار نرخ جهش حداکثر انتخاب شد. به تدریج در طول نسل‌های اجرایی برای بهره‌وری بیشتر مقدار نرخ جهش کاهش یافت. حداکثر تعداد نسل اجرای الگوریتم ۱۰۰۰ انتخاب شد. توصیف کامل این پارامترها در جای دیگر آمده است [۷].

جدول ۳: ترکیب وزن‌های نسبت داده شده به دو هدف راندمان و شاخص خاکستر در حل مسئله مدار فلوتاسیون کارخانه زغالشویی

زرنند					
وزن‌های نسبت داده شده به:		وزن‌های نسبت داده شده به:			
راندمان	شاخص خاکستر	شماره اجرا	راندمان	شاخص خاکستر	شماره اجرا
۰/۴	۰/۶	۸	۰	۱	۱
۰/۵	۰/۵	۹	۰/۰۰۱	۰/۹۹۹	۲
۰/۶	۰/۴	۱۰	۰/۰۱	۰/۹۹	۳
۰/۷	۰/۳	۱۱	۰/۱	۰/۹	۴
۰/۸	۰/۲	۱۲	۰/۲	۰/۸	۵
۰/۹	۰/۱	۱۳	۰/۲۵	۰/۷۵	۶
۱	۰	۱۴	۰/۳	۰/۷	۷

دبی باطله در زمان تعیین الگوی اختلاط باید مراحل مدل‌سازی با در نظر گرفتن زمان ماند جدید تکرار شود.

اگر $\tau_{pf,i}$ ، τ_i زمان ماند مربوط به دبی Q_i باشند که برای شروع مدل‌سازی استفاده شده‌اند و دبی محاسبه شده از مدل‌سازی $Q_{t(model)}$ باشد، زمان ماند‌های جدید ($\tau'_{pf,i}$ ، τ'_i) برای تکرار مدل‌سازی از روابط ۱۶ و ۱۷ قابل محاسبه است.

$$\tau'_{pf,i} = \tau_{pf,i} \times \frac{Q_t}{Q_{t(model)}} \quad (16)$$

$$\tau'_i = \tau_i \times \frac{Q_t}{Q_{t(model)}} \quad (17)$$

با مشخص شدن زمان‌های ماند جدید، مراحل مدل‌سازی تکرار می‌شود تا زمانی که نسبت $\frac{Q_t}{Q_{t(model)}}$ برابر یک شود. سپس کارآیی متالورژیکی مورد نظر برای هر ترکیب از مدار فلوتاسیون از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود [۲۲، ۷].

برای بررسی قابلیت مدل به‌کار گرفته شده در پیش‌بینی پارامترهای متالورژیکی مدار فلوتاسیون، ۱۴ نمونه در بازه زمانی ۵۰ روز از خوراک فلوتاسیون گرفته شد و وضعیت کارآیی مدار فلوتاسیون با استفاده از نمونه‌های تهیه شده و مدل به‌دست آمد [۷ و ۲۰].

۲-۲- بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون با روش مجموع وزن‌دار

برای یافتن ترکیب بهینه مدار فلوتاسیون کارخانه زرنند بر اساس دو هدف محتوای خاکستر محصول در محدوده ۱۰/۸ و بیشینه راندمان از روش مجموع وزن‌دار استفاده شد. برای این که بتوان وزنی را به هدف محتوای خاکستر مطلوب (۱۰/۸) نسبت داد، شاخص محتوای خاکستر به صورت رابطه (۱۸) تعریف شد:

$$f_2 = \begin{cases} \frac{Ash}{Ash_{desired}}, & \text{if } Ash < Ash_{desired} \\ \frac{Ash_{desired}}{100-Ash}, & \text{if } Ash > Ash_{desired} \end{cases} \quad (18)$$

که در آن Ash ، خاکستر به‌دست آمده از مدار و $Ash_{desired}$ ، خاکستر مطلوب است. شاخص محتوای خاکستر 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 [۷].

به منظور بررسی تأثیر مقادیر وزن نسبت داده شده به دو هدف مورد نظر در بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون کارخانه زرنند، ۱۴ الگوریتم با ترکیب وزن‌های شرح داده شده در جدول ۳ اجرا

جدول ۴: مقادیر پارامترهای اولیه الگوریتم وراثتی

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

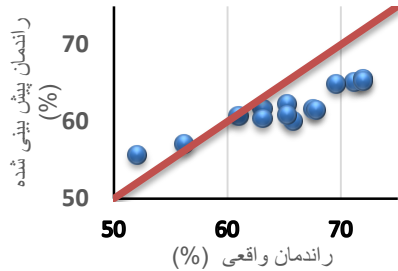
۳- نتایج

۳-۱- بررسی صحت نتایج مدل‌سازی مدار فلوتاسیون

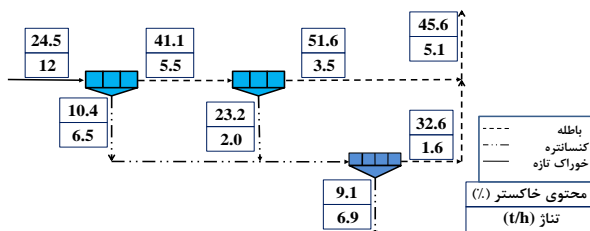
برای اعتبار سنجی مدل در چهارده روز مختلف نمونه‌هایی از مدار جهت تعیین راندمان کارخانه و همچنین مدل‌سازی گرفته شد. شکل ۲ مقایسه راندمان پیش‌بینی شده از مدل را با راندمان واقعی نشان می‌دهد. خط توپر نشان دهنده مکان هندسی نکاتی است که در آن‌ها راندمان مدل و راندمان واقعی برابر می‌باشند. به عبارت دیگر، میزان دوری نقاط از این خط نشان دهنده خطای مدل در پیش‌بینی راندمان است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت مدل در پیش‌بینی راندمان کلی مدار خوب است. در بعضی از نقاط راندمان پیش‌بینی شده بیشتر از مقدار واقعی و در بعضی نقاط کمتر از مقدار واقعی است. این امر نشان می‌دهد که خطای سیستماتیک در مدل‌سازی وجود ندارد و ماهیت خطا اتفاقی است. با بررسی نتایج به‌دست آمده می‌توان عنوان کرد خطای پیش‌بینی راندمان با مدل با اطمینان ۹۵ درصد ۴/۲ درصد است. این خطا در خصوص محتوی خاکستر کنسانتره ۰/۷۵ درصد به‌دست آمد.

با اطمینان از دقت نسبی مدل در پیش‌بینی راندمان و محتوی خاکستر کنسانتره، مدار فلوتاسیون اولیه کارخانه مدل‌سازی شد (شکل ۳). اعداد نشان داده شده مقادیر موازنه شده دبی جرمی و محتوی خاکستر هر جریان می‌باشند. این اعداد با توجه به مشخصات خوراک ورودی و وضعیت اختلاط در سلول (توزیع زمان ماند) و بکارگیری مدل سینتیک مرتبه یک به‌دست آمدند. نتایج نشان داد که خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان کلی مدار به ترتیب ۹/۱ درصد و ۵۷/۶ درصد می‌باشند. در این حالت محتوی خاکستر باطله نهایی ۴۵/۶ درصد با مقدار ۵/۱ تن بر

ساعت به‌دست آمد. نکته قابل توجه تفاوت چشمگیر محتوی خاکستر کنسانتره سلول‌های اول (۱۰/۴ درصد) و دوم (۲۳/۲ درصد) است که در نهایت با هم مخلوط می‌شوند که این کار نمی‌تواند مفید واقع شود. اغلب جریان‌هایی که با هم مخلوط می‌شوند باید مشخصات نزدیکی داشته باشند. از طرف دیگر، دو جریانی که باطله نهایی را نیز تشکیل می‌دهند از نظر محتوی خاکستر بسیار متفاوت می‌باشند؛ یکی ۳۲/۶ درصد و دیگری ۵۱/۶ درصد است.



شکل ۲: مقایسه راندمان واقعی با مقادیر بدست آمده از مدل برای ۱۴ روز کاری متفاوت



شکل ۳: نتایج مدل‌سازی مدار فلوتاسیون اولیه کارخانه زغالشویی زرنند

۳-۲- تحلیل و بررسی مدارهای پیشنهادی با روش مجموع وزن‌دار

مقدار انحراف معیار نسبی محتوی خاکستر و راندمان مدارهای ارائه شده در روش مجموع وزن‌دار برابر با ۰/۱ به‌دست آمد. در جدول (۵) کارایی بهترین مدار به‌دست آمده در هر اجرای الگوریتم با روش مجموع وزن‌دار ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد در حالتی که وزن تخصیص داده شده به شاخص محتوی خاکستر ۱ باشد، ترکیب مداری ارائه می‌شود که حداقل مقدار راندمان (کمتر از راندمان مدار اولیه کارخانه) را دارد ولی مقدار محتوی خاکستر در محدوده مطلوب است. در حالت دیگر، اگر وزن ۱ به راندمان نسبت داده شود، با وجود آن که ترکیب مدار فلوتاسیون را با بیشترین مقدار راندمان نتیجه می‌دهد اما کیفیت محتوی خاکستر محصول از حالت مطلوب بسیار

به دست آمده از اجرای شماره ۴، محتوی خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان به ترتیب ۱۰/۹ و ۶۵/۲ درصد به دست آمد. مدل سازی نشان داد که مقدار باطله نهایی مدار ۴/۲ تن بر ساعت با محتوی خاکستر ۵۰/۲ درصد خواهد بود. راندمان مدار به دست آمده نسبت به مدار اولیه ۷/۶ درصد بیشتر به دست آمد.

مدار پیشنهادی در اجرای شماره ۵ در شکل (۶) نشان داده شده است. مانند دو مدار پیشنهادی قبل، خوراک ورودی به سه سلولی مرحله اول (پرعیارکنی اولیه) وارد می شود. اما در این مدار باطله پرعیارکنی اولیه به تک سلولی مرحله دوم (رمق گیر اولیه) وارد می شود. باطله رمق گیر اولیه به سه سلولی مرحله سوم (رمق گیر ثانویه) وارد می شود و باطله سه سلولی مرحله سوم، باطله نهایی مدار را تشکیل می دهد و از مدار خارج می شود. کنسانتره رمق گیر ثانویه به اول مدار برگردانده می شود. کنسانتره پرعیارکنی اولیه همراه با کنسانتره رمق گیر اولیه نیز به عنوان کنسانتره نهایی از مدار خارج می شوند. محتوی خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان به ترتیب ۱۱ و ۶۵/۸ درصد به دست آمد. محاسبات نشان داد که باطله نهایی با مقدار ۴/۱ تن بر ساعت دارای محتوی خاکستر ۵۰/۶ درصد بود. راندمان مدار به دست آمده از اجرای شماره ۵، نسبت به مدار اولیه ۸/۲ درصد بیشتر به دست آمد.

جدول ۵: کارآیی متالورژیکی مدارهای به دست آمده از بهینه سازی با

روش مجموع وزن دار

شماره اجرا	محتوی خاکستر کنسانتره (%)	راندمان (%)
۱	۱۰/۵	۵۲/۵
۲	۱۱/۲	۶۱/۳
۳	۱۰/۸	۶۴/۸
۴	۱۰/۹	۶۵/۲
۵	۱۱	۶۵/۸
۶	۱۳/۹	۷۴/۴
۷-۱۳	۱۵/۱	۷۷/۳
۱۴	۱۵/۲	۷۷/۲

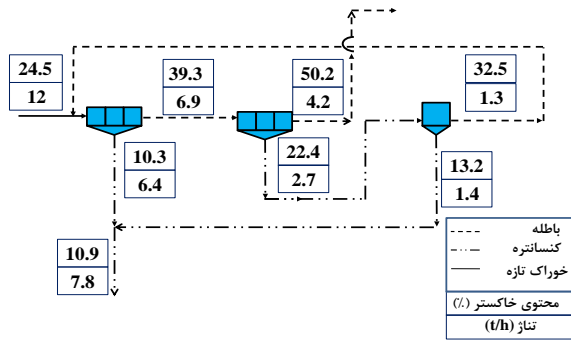
دور می شود. با بررسی نتایج ترکیب وزن های تخصیص داده شده دیگر، نشان می دهد که از اجرای شماره ۲ تا ۵ (تخصیص وزن بیشتر از ۰/۸ به محتوای خاکستر)، ترکیب های مدار فلوتاسیون با محتوای خاکستر محصول در محدوده مطلوب حاصل می شود و مقدار راندمان آن ها بیشتر از راندمان مدار اولیه کارخانه است. برای اجراهای ۶ تا ۱۴، با وجود مقدار راندمان بالا، محتوای خاکستر محصول ترکیب مدارهای پیشنهاد شده در محدوده مطلوب نیست.

از این رو با توجه به نتایج، می توان با تخصیص وزن نسبت داده شده مناسب به اهداف مورد نظر، تابع هدفی را ساخت که در نهایت ترکیب بهینه مدار فلوتاسیون را ارائه دهد.

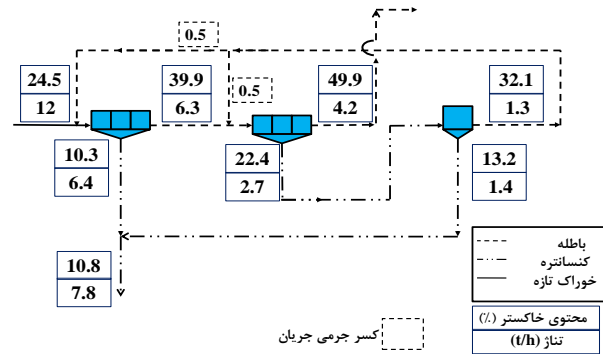
به منظور تحلیل ترکیب مدارهای مطلوب ارائه شده از بهینه سازی با روش مجموع وزن دار، ترکیب مدارهای فلوتاسیون شماره ۳، ۴ و ۵ در ادامه مورد بررسی قرار گرفته اند.

مدار پیشنهادی در اجرای شماره ۳ همراه با موازنه جرم و خاکستر در شکل ۴ نشان داده شده است. کل خوراک ورودی به سه سلولی مرحله اول (پرعیارکنی اولیه) وارد می شود. باطله پرعیارکنی اولیه به سه سلولی مرحله دوم (رمق گیر) وارد می شود. کنسانتره رمق گیر به تک سلولی مرحله سوم (پرعیارکنی ثانویه رمق گیر) وارد می شود و باطله رمق گیر از مدار خارج می شود (باطله نهایی). باطله پرعیارکنی ثانویه رمق گیر به دو قسمت مساوی تقسیم شده و به ورودی پرعیارکنی اولیه و ورودی رمق گیر برمی گردد. کنسانتره پرعیارکنی اولیه همراه با کنسانتره پرعیارکنی ثانویه رمق گیر، کنسانتره نهایی را تشکیل می دهد. محتوی خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان به ترتیب ۱۰/۸ و ۶۴/۸ درصد به دست آمد. نتایج مدل سازی نشان داد که مقدار باطله نهایی ۴/۲ تن بر ساعت و محتوی خاکستر آن ۴۹/۹ درصد است. راندمان مدار پیشنهادی نسبت به مدار اولیه، ۷/۲ درصد افزایش یافت.

ترکیب مدار پیشنهادی در اجرای شماره ۴ در شکل (۵) نشان داده شده است. تنها تفاوت مدار پیشنهادی در اجرای شماره ۴ با مدار پیشنهادی در اجرای شماره ۳ در نحوه ی برگرداندن باطله ی پرعیارکنی ثانویه رمق گیر می باشد. در مدار به دست آمده از اجرای شماره ۳ این جریان به طور مساوی بین پرعیارکنی اولیه و رمق گیر تقسیم می شود. در حالی که در مدار به دست آمده از اجرای شماره ۴ این جریان به طور کامل به ابتدای مدار برگردانده می شود. کنسانتره پرعیارکنی اولیه همراه با کنسانتره پرعیارکنی ثانویه رمق گیر، کنسانتره نهایی مدار را تشکیل می دهند. در مدار

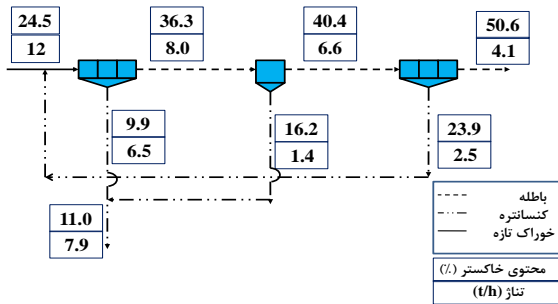


شکل ۵: ترکیب مدار پیشنهادی در اجرای شماره ۴ با روش مجموع وزن دار

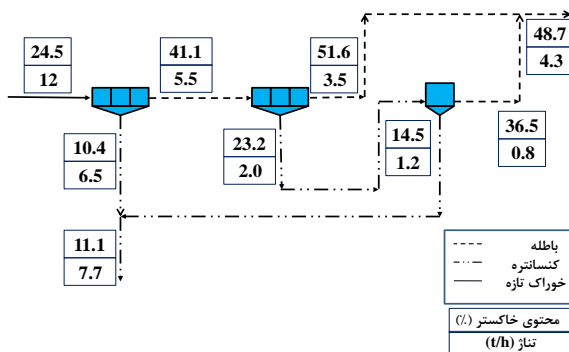


شکل ۴: ترکیب مدار پیشنهادی در اجرای شماره ۳ با روش مجموع وزن دار

۳-۳- بهترین مدار پیشنهادی از نظر عملیاتی و اجرای آن در کارخانه زغالشویی زرد



شکل ۶: ترکیب مدار پیشنهادی در اجرای شماره ۵ با روش مجموع وزن دار



شکل ۷: موازنه جرم و خاکستر در مدار فلوتاسیون کنونی کارخانه زغالشویی زرد

با توجه به محدودیت‌های موجود در کارخانه زغالشویی زرد [۱۲-۱۴]، ترکیب مدار پیشنهاد شده در شکل ۵ با محتوی خاکستر کنسانتره ۱۰/۹ درصد و راندمان ۶۵/۲ درصد به عنوان مداری که از نظر عملیاتی قابل اجرا است، انتخاب و پیشنهاد شد. از آنجایی که در کارخانه امکان بازگرداندن باطله تک سلولی مرحله سوم به اول مدار فراهم نشد، باطله این مرحله به همراه باطله سه مرحله‌ای پرعیارکنی ثانویه، به عنوان باطله نهایی از مدار خارج گردید. ترکیب این مدار فلوتاسیون در شکل (۷) نشان داده شده است. مدل‌سازی سینتیکی مدار کنونی در کارخانه نشان داد که محتوی خاکستر کنسانتره نهایی و راندمان به ترتیب، ۱۱/۱ درصد و ۶۴/۳ درصد است و محتوی خاکستر باطله نهایی ۴۸/۷ درصد با مقدار ۴/۳ تن بر ساعت به دست آمد. همچنین راندمان این مدار نسبت به راندمان مدار اولیه کارخانه، ۶/۷ درصد افزایش یافت. با اعمال تغییر مدار اولیه فلوتاسیون به مدار کنونی، راندمان متوسط سالیانه مدار فلوتاسیون در کارخانه ۶۲ درصد می‌باشد که این مقدار در بازه قابل قبول خطای متوسط پیش‌بینی راندمان با استفاده از مدل است [۱۲-۱۴].

۴- نتیجه‌گیری

• مقایسه نتایج مدل‌سازی مدار فلوتاسیون با مقادیر واقعی نشان داد که مدل سینتیکی توزیع شده با اطمینان ۹۵ درصد، راندمان کلی مدار را با خطای متوسط $\pm 4/2$ درصد محتوی خاکستر کنسانتره را با خطای متوسط $\pm 0/75$ درصد پیش‌بینی می‌کند.

• در بهینه‌سازی ترکیب مدار فلوتاسیون، هدف دستیابی به مقادیر مطلوب پارامترهای متالورژیکی است اما در بین آنها رسیدن به بعضی از پارامترهای متالورژیکی نسبت به دیگر پارامترها ارجحیت دارد از این رو با بکارگیری روش مجموع وزن دار و نسبت دادن وزن بیشتر به پارامتر با اهمیت بیشتر،

- [5] Schena, G.D., Zanin, M. and Chiarandini, A., 1997, *Procedures for the automatic design of flotation networks*, Int. J. Miner. Process., 52:137- 160.
- [6] Nezamabadi, H., 2010, *Genetic algorithm*, Shahid Bahonar University of Kerman Press, 1st Edition, pp. 185.
- [7] Ghabadi, P., Yahyaei, M., Banisi, S., 2011, *Optimisation of the performance of flotation circuits using a genetic algorithm oriented by process-based rules*, Int. J. Miner. Process., 98, pp.174-181.
- [8] Cisternas, L. A, Lucay, F., Gálvez, E. D., 2014, *Effect of the objective function in the design of concentration plants*, Minerals Engineering, 63, pp.16-24.
- [9] Censor, Y., 1977, *Pareto Optimality in Multiobjective Problems*, Appl. Math. Optimiz., Vol. 4, pp 41-59.
- [10] Galvez, E.D., Cisternas, L.A., Herrera, G. and Gani, R., 2009, *A group contribution method for mineral flotation circuit design*, 10th International Symposium on Process Systems Engineering.
- [11] 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.
- [12] Pirouzan, D., Yahyaei, M., Banisi, S., 2012, *Application of an oriented genetic algorithm in multiobjective optimization of the Zarand coal washing flotation circuit*, Analytical & Numerical Methods in Mining Engineering, Vol. 3, 75-88.
- [13] Pirouzan, D., Yahyaei, M., Banisi, S., 2014, *Pareto based optimization of flotation cells configuration using an oriented genetic algorithm*, Int. J. Miner. Process., 126, 107-116.
- [14] Pirouzan, D., Yahyaei, M., Banisi, S., 2012, *Pareto based optimization of flotation cells configuration using an oriented genetic algorithm*, IMPC, New Delhi, India, Paper No. 391.
- [15] Ferreira, J.P. and Loveday, B.K., 2000, *An improved model for simulation of flotation circuits*, Minerals Engineering, 13: 1441- 1453.
- [16] Loveday, B.K. and Brouckaert, C.J., 1995, *An analysis of flotation circuit design principles*, Chemical Engineering Journal, 59: 15- 21.
- [17] Fichura, M.A., Chudacek, M.W., 1992, *Batch cell flotation models- A review*, Min. Eng., Vol.5, pp. 41- 55.
- [18] Arbiter, N., Harris, C.C., 1962. *Froth Flotation 50th Anniversary Volume*. In: Fuerstenau, D.W. (Ed.), Chapter 8: —Flotation Kinetics. AIME, New York, pp. 215-246.
- [19] Eskandari Seyahkahi, M., Banisi, S., Sam, A., 2004, *Increasing the efficiency and alteration of the Zarand coal washing plant flotation circuit*, Forth Mining Engineering Student's Conference, Kerman, pp.143-154.
- [20] Hajizadeh, A., Yahyaei, M., Mozafari, P., Banisi, S., 2010, *Determination of residence time distribution of material in the Zarand coal washing plant flotation circuit*, Mining Industries Conference, Shahid Bahonar University of Kerman.
- [21] Farmad, A.R., Yahyaei, M., Banisi, S., 2009, *Determination of residence time distribution of material in grinding and flotation circuits by spreadsheet programs*, Third Mining Engineering Conference, Yazd, pp. 1998-2003.

ترکیب مدار بهینه‌ای حاصل می‌شود که محصول پرعیار شده آن به هدف مورد نظر نزدیک‌تر است.

- با بکارگیری روش مجموع وزن‌دار، همه ترکیب وزن‌های ممکن نسبت داده شده به اهداف، مورد ارزیابی قرار گرفت. از میان همه ترکیب وزن‌های مختلف نسبت داده شده به اهداف، نتیجه سه ترکیب وزنی برای کارخانه مناسب تشخیص داده شد.
- پاسخ‌های به‌دست آمده از الگوریتم وراثتی هدایت شده با روش مجموع وزن‌دار به دلیل وابستگی نتایج به مقادیر اولیه‌ی نسبت‌های وزنی، در هر بار اجرای بهینه‌سازی، تنها یک ترکیب مدار بهینه را ارائه می‌دهد.
- استفاده از روش مجموع وزن‌دار الگوریتم وراثتی هدایت شده نشان داد که با تغییر ترکیب مدار فلوتاسیون امکان افزایش راندمان مدار از $57/6$ درصد در مدار اولیه به $65/8$ درصد در بهترین ترکیب وجود دارد. ضمن این که کیفیت کنسانتره نهایی در حد مطلوب ($10/8$ درصد) حفظ می‌شود..
- مدار بهینه پیشنهادی در کارخانه به اجرا گذاشته شد. با حفظ محتوی خاکستر کنسانتره نهایی در محدوده قابل قبول، نتایج مدل‌سازی نشان داد که راندمان این مدار نسبت به مدار اولیه کارخانه، $6/7$ درصد افزایش یافت.
- با اعمال تغییر در ترکیب مدار فلوتاسیون اولیه کارخانه، متوسط سالیانه راندمان مدار فلوتاسیون با حفظ کیفیت محتوی خاکستر کنسانتره به 62 درصد افزایش یافت.

۵- تقدیر و تشکر

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

مراجع

- [1] Dey, A.K., Kapur, P.C., Mehrotra, S.P., 1989a, *A search strategy for optimization of flotation circuits*, Int. J. Miner. Process., Vol. 26, pp. 73-93.
- [2] Green, J.C.A., 1984, *The optimization of flotation networks*, Int. J. Miner. Process., 13: 83- 103.
- [3] Loveday, B.K., Hemphill, A.L., 2006, *Optimization of a multistage flotation plant using plant survey data*, Minerals Engineering, 19: 627- 632.
- [4] Cisternas, L.A., Galvez, E.D., Zavala, M.F. and Magna, J., 2004, *A MILP model for the design of mineral flotation circuits*, Int. J. Miner. Process., 74: 121- 131.

[22] Dey, A., Kapur, P.C. and Mehrotra, S.P., 1989b, *Modeling of flotation kinetics and design of optimum flotation circuits*, Int. J. Miner. Process., 26: 73- 94

