

## ارزیابی چیدمان مدارهای فلوتاسیون با تلفیق روش تحلیل مدار خطی و نمودار جریان سیگنال، در کارخانه مس قلعه زری

وحید رادمهر<sup>۱</sup>؛ سیدضیاءالدین شفائی تنکابنی<sup>۲\*</sup>؛ محمد نوع پرست<sup>۳</sup>؛ هادی عبداللهی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تهران، v.radmehr@ut.ac.ir

۲- استاد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تهران، zshafaie@ut.ac.ir

۳- استاد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تهران، noparast@ut.ac.ir

۴- استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تهران، H\_abdollahi@ut.ac.ir

(دریافت ۱۳ اردیبهشت ۱۳۹۴، پذیرش ۳ مرداد ۱۳۹۵)

### چکیده

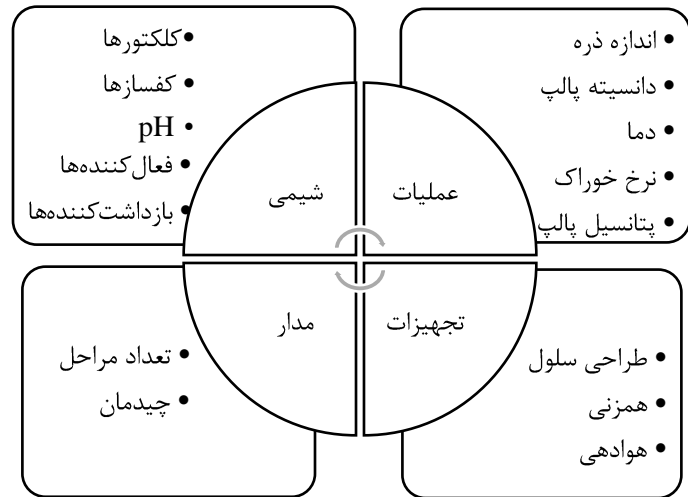
در مدارهای فرآوری مواد معدنی، از جدایش مرحله‌ای برای تولید محصولی با بازیابی و کیفیت مناسب استفاده می‌شود. چون به‌طور معمول، سالانه میلیون‌ها تن ماده معدنی در این مدارها تحت عملیات پرعبارسازی قرار می‌گیرد، دستیابی به بهبودی اندک از طریق تغییر در چیدمان مدار می‌تواند تأثیر اقتصادی قابل توجهی داشته باشد. همچنین چون برای یک مدار جدایش، طرح‌های مختلفی وجود دارد یافتن بهترین ترکیب از طریق انجام آزمایش، زمان‌بر و پرهزینه است. در این تحقیق، از اصول تحلیل مدار برای ایجاد ارتباط ریاضی بین مراحل مختلف در مدارهای فرآوری استفاده شده است. این کار با در نظر گرفتن بازیابی به‌عنوان تابع انتقال برای هر مرحله و سپس استفاده از معیار دقت جدایش برای ارزیابی تابع انتقال مدار انجام شد. چون محاسبات دستی فراوان سبب محدود شدن روش تحلیل مدار شده است؛ برای تسریع در انجام محاسبات، علاوه بر پیاده‌سازی روش تحلیل مدار در نرم‌افزار متلب، گراف‌های جریان سیگنال و فرمول بهره‌میسون به‌عنوان جایگزینی برای دیاگرام‌ها بلوکی معرفی شد. در نتیجه، این امکان ایجاد شد تا چیدمان مدارهای با تعداد مراحل زیاد و پیچیده بررسی شود. روش پیشنهادی بر روی یک مدار با ۶ مرحله پرعبارسازی پیاده شد. با اصلاح چیدمان مدار، دقت جدایش از ۱/۴۹ به ۲/۲ افزایش یافت. این افزایش می‌تواند به بهبود جدایش مواد میانی در مدار جدایش کمک کند. همچنین نشان داده شد که اگر بازیابی مربوط به هر بانک مشخص باشد با توجه به دبی فلز ورودی به شبکه جدایش می‌توان دبی فلز در هر یک از جریان‌ها را محاسبه کرد.

### کلمات کلیدی

چیدمان مدار، گراف جریان سیگنال، تحلیل مدار، نرم افزار متلب

۱- مقدمه

مدارهای جدایش مواد معدنی به طور معمول برای تغلیظ دامنه وسیعی از کانی‌ها استفاده می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در جدایش به روش فلوتاسیون، پارامترهای مختلفی نقش دارند که امکان مطالعه همه پارامترها در یک زمان وجود ندارد [۱].



شکل ۱: مهم‌ترین مؤلفه‌ها و پارامترهای تأثیرگذار در مدارهای فلوتاسیون [۱].

طراحی مدارهای فرآوری موضوعی گسترده است و در طرح نهایی باید تعداد و نوع واحدهای عملیاتی<sup>۱</sup> و چیدمان مدار مشخص شود. با توجه به حجم‌های جریان زیاد، هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا و انعطاف ناپذیری نسبی فلوشیت نهایی، باید تلاش قابل توجهی در فاز طراحی برای اطمینان از انتخاب چیدمان مناسب مدار جدایش در ابتدای طراحی فرآیند صورت گیرد [۲].

در ۴۰ سال گذشته، برای حل این چالش‌های طراحی، از مدل‌سازی و شبیه‌سازی محاسباتی کمک گرفته شد. از زمان آغاز این موضوع، مدل‌های فرآیند از برازش منحنی بر داده‌های تجربی به سمت مدل‌های پدیده‌شناختی و مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر فیزیک فرآیند پیشرفت کرد [۳، ۴].

اغلب نرم‌افزارهای تجاری طراحی مدار متکی به مدل‌های پدیده‌شناختی فرآیند برای واحدهای عملیاتی مختلف هستند.

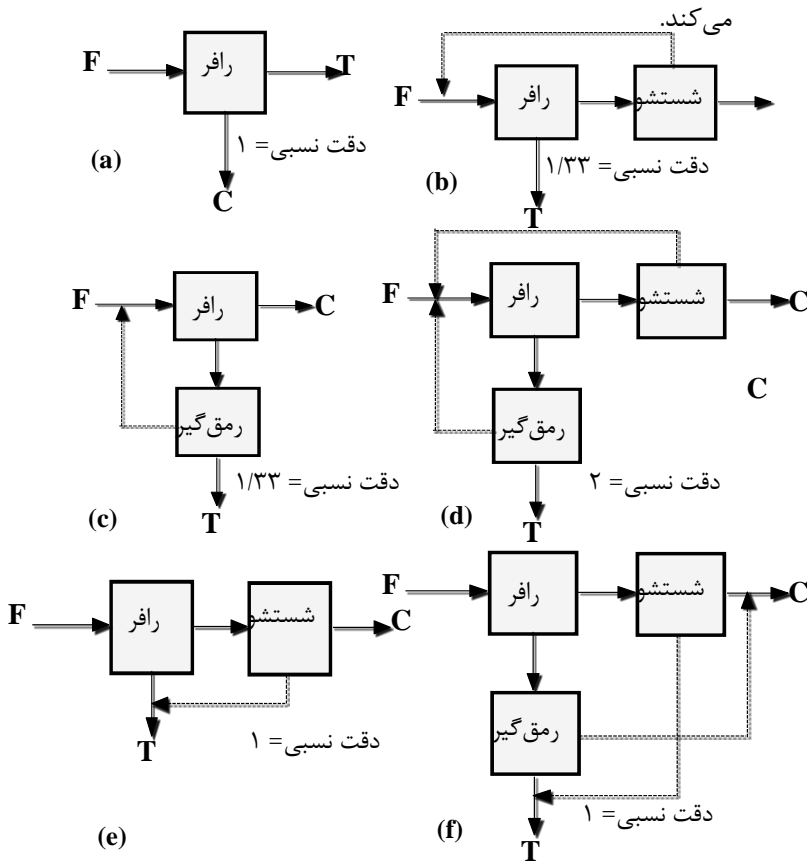
یک نکته منفی مدل‌های پدیده‌شناختی آن است که نیازمند تست‌های آزمایشگاهی وسیع برای کالیبره کردن پارامترهای مدل هستند. به‌طور کلی اعتبار شبیه‌سازی به ابعاد و درستی مجموعه داده‌های آزمایشگاهی وابسته است. مطالعات بزرگ مقیاس کردن و طراحی‌های اولیه اغلب با یک چیدمان مدار صوری (ظاهری) در طول تست‌های مقیاس آزمایشگاهی شروع می‌شود. این نتایج در ادامه به‌طور متوالی برای ساخت مدل‌های فرآیند و هدایت مطالعات سیکل بسته و مقیاس پایلوت استفاده می‌شوند. در هر حال اگر نتایج مقیاس‌بندی نامناسب باشد، ممکن است فرآیند نیازمند فلوشیت جایگزین شود. بسته به درجه تغییرپذیری فلوشیت، ممکن است داده‌های آزمایشگاهی برای طرح‌های اصلاحی معتبر نباشد. تست‌های آزمایشگاهی جدید مورد نیاز است و کل فرآیند به‌صورت تکراری و به‌طور گسترده با سعی و خطا و تجربه قبلی انجام می‌شود [۵].

در نهایت فرآیند طراحی می‌تواند منجر به راه‌حل‌های ناکارآمد و زیر بهینه شود، چرا که روال شبیه‌سازی هیچ ایده بنیادی بر روی نحوه چیدن مدار فراهم نمی‌کند.

یکی از ابزارهای طراحی و ارزیابی اولیه مدار، تحلیل مدار است [۶-۸]. این روش از اصول بنیادی جدایش برای تحلیل چیدمان و اتصال واحدهای عملیاتی استفاده می‌کند. ارزیابی تحلیلی مدار در نهایت امتیازی<sup>۲</sup> را برای کارایی جدایش نسبی یک مدار نسبت به مدارهای دیگر فراهم می‌کند. این امتیاز در ادامه می‌تواند برای رتبه‌بندی گزینه‌های چیدمان استفاده شود. تحلیل مدار متکی بر حل تحلیلی مدار است. این بیان ریاضی، بازیابی کلی مدار را به‌عنوان تابعی از بازیابی واحدهای تکی توصیف می‌کند. نشان داده شده است که این حل تحلیلی می‌تواند فقط از اتصال بین واحدها با استفاده از محاسبات جبری به‌دست آید [۶]. در ادامه از این عبارت تحلیلی به‌دست آمده برای ارزیابی مدار استفاده می‌شود. روش تحلیل مدار متکی به مدل‌های محدود فرآیند نیست و به هیچ دانش قبلی از واحدهای عملیاتی، مواد خوراک یا محیط عملیاتی جدایش نیاز ندارد.

محدود بودن اطلاعات مورد نیاز در این روش سبب شده تا در فاز اولیه طراحی کارخانه مفید واقع شود. جایی که

اصول اساسی این تکنیک می‌تواند به بهترین شکل به وسیله مجموعه‌ای از مثال‌های ساده نشان داده شود. فرآیند تک مرحله‌ای نشان داده شده در شکل ۲(a) را در نظر بگیرید. نسبت کنسانتره به خوراک (C/F) می‌تواند بر حسب یک تابع احتمال بدون بعد (P) بیان شود که ذرات را بر اساس یک یا چند ویژگی فیزیکی برای گزارش به کنسانتره انتخاب می‌کند.



شکل ۲: مقایسه دقت جدایش نسبی پیش‌بینی شده توسط تحلیل مدار برای چندین چیدمان متفاوت مدار [۱۰، ۱۵ و ۱۸].

برای جدایش‌های مبتنی بر دانسیته، P می‌تواند به‌طور تجربی از یکی از چندین تابع S شکل همانند شکل ۳، تخمین زده شود. این منحنی، تابع احتمال را برای مقادیر مختلف نسبت وزن محصول نرمال شده (Z) با  $SG/SG_{50}$  نشان می‌دهد. حد جدایش<sup>۴</sup> وزن مخصوص ( $SG_{50}$ ) توسط مقدار  $Z = 1$  که در آن  $P = 0.5$  است بیان می‌شود. چون منحنی با شیب بیشتر نشان‌دهنده جدایش دقیق‌تر<sup>۵</sup> است، شیب منحنی جدایش ارزیابی شده در  $Z = 1$  می‌تواند به‌عنوان شاخص نسبی از دقت جدایش در نظر گرفته شود.

اطلاعات گسترده از خوراک و داده‌های آزمایشگاهی می‌تواند مانعی پرهزینه یا غیرقابل دسترس باشد. محدودیت روش تحلیل مدار به واسطه فرض خطی بودن است. به‌طور خلاصه خطی بودن بیان می‌کند که منحنی جدایش یک واحد عملیاتی تحت تأثیر ترکیب یا نرخ خوراک ورودی به آن قرار نمی‌گیرد. با این‌که این فرض برای همه واحدهای عملیاتی معتبر نیست، تحقیقات انجام شده از عملکرد خطی واحدهای عملیاتی حمایت کرده و بررسی‌های تجربی، خطی بودن را در برخی موارد تأیید کرده است [۹-۱۷]. تحقیقات قبلی این ادعاها را از طریق مطالعات تئوری، آزمایشگاهی و صنعتی تأیید کرده است. این مثال‌ها شامل بهینه‌سازی عیار-بازیابی [۷]، تحلیل دینامیکی کارایی سلول فلوتاسیون [۸]، جدایش‌های چند مرحله‌ای با خوراک چندگانه [۱۰]، بارگیری سلول<sup>۳</sup> رافر-رمق‌گیر-کلینر [۱۱]، تعاریف بنیادی تابع فرآیند [۱۲] و جواب‌های موجه طراحی [۱۳ و ۱۴] است. مطالعات دیگر، از تکنیک تحلیل مدار در تأسیسات صنعتی و عملیاتی شامل جداکننده‌های اسپیرال [۱۵]، مدار فلوتاسیون ستونی [۱۶]، جداکننده‌های مغناطیسی [۱۷] و بهینه‌سازی کارخانه کانی سنگین [۱۸] استفاده کردند. همه مطالعات مذکور به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از حل تحلیلی مدار به‌عنوان پایه‌ای برای تحلیل بنیادی بیشتر استفاده کردند. برخی دیگر از محققین نیز از حل تحلیلی مدار برای انجام طراحی مدار [۲۱-۱۹]، تحلیل حساسیت مدار [۲۲] و نیز شبیه‌سازی مدار [۲۳] استفاده کردند. این کاربرد وسیع به‌طور گسترده نشان‌دهنده مفید بودن حل تحلیلی مدار است. با افزایش تعداد مراحل استفاده از روش تحلیل مدار دشوار شده و نیازمند محاسبات فراوان می‌باشد. در نتیجه در این تحقیق موارد زیر ارائه شده است:

- بیان مفهوم تحلیل مدار و نقش آن در ارزیابی مدارهای جدایش؛
- پیاده‌سازی تحلیل مدار در نرم‌افزار متلب؛
- کاربرد گراف‌های جریان سیگنال برای ایجاد ارتباط بین مراحل مختلف مدار جدایش و حل تحلیلی آن.

## ۲- تحلیل مدار

$$\frac{C}{F} = \frac{P_2 P_1}{1 - P_1 + P_1 P_2} \quad (5)$$

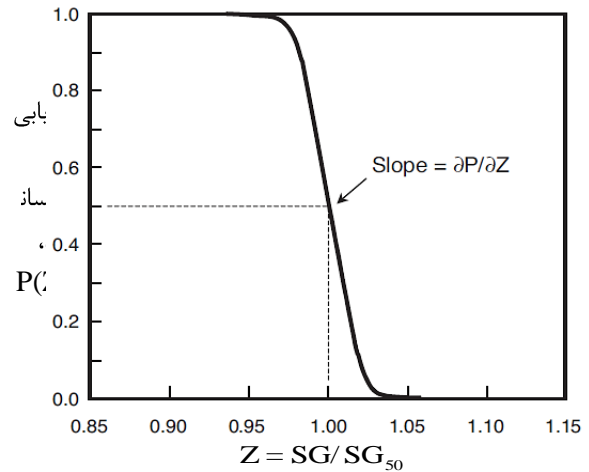
اگر فرض شود که تابع احتمال (P) برای همه واحدها یکسان است، سپس دقت جدایش برای مدار ترکیبی دو مرحله‌ای دوباره می‌تواند با گرفتن مشتق نسبت کنسانتره به خوراک به دست آید. با توجه به اینکه در  $Z=1$  داریم  $P=0.5$ ، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d(C/F)}{dZ} = \left( \frac{2P - P^2}{(P^2 - P + 1)^2} \right) \frac{dP}{dZ} = 1.33 \frac{dP}{dZ} \quad (6)$$

مقایسه معادلات ۱ و ۶، نشان می‌دهد که دقت جدایش برای مدار رافر-کلینر به‌طور تئوری  $1/33$  بار بالاتر از این مقدار برای یک مدار تک مرحله‌ای است. با استفاده از این شیوه یکسان، دقت جدایش نسبی دیگر چیدمان‌های مدار نیز می‌تواند تعیین شود. چیدمان استاندارد رافر-کلینر (شکل ۱(b)) و چیدمان رافر-اسکونجر (شکل ۱(c)) هر کدام دارای یک دقت جدایش نسبی هستند که  $1/33$  بار بزرگتر از فرآیند تک مرحله‌ای است. چیدمان رافر-اسکونجر-کلینر (شکل ۱(d)) حاوی سه مرحله کلی، دارای دقت جدایش ۲ بار بزرگتر از فرآیند تک مرحله‌ای است. البته جای شگفتی است که برخی مدارهای چند مرحله‌ای نسبت به فرآیند تک مرحله‌ای دارای جدایش بهتری نیستند (شکل ۱(e) و ۱(f)).

روش تحلیل مدار می‌تواند برای رتبه‌بندی مدارها به‌طور اولیه در فاز طراحی استفاده شود که در آن داده‌های آزمایشگاهی و مشخصات خوراک در دسترس نیست. این ارزیابی‌ها می‌تواند سپس برای هدایت آزمایش‌ها و مطالعات شبیه‌سازی استفاده شود که در آن معیار واقعی کارایی می‌تواند به‌صورت عددی بیان شود. این روش پایه‌ای برای طراحی و انتخاب مدار بر مبنای قوانین بنیادی جدایش به جای مطالعات سعی و خطای آزمایشگاهی فراهم می‌کند. با این حال کاربرد تحلیل مدار به معنای حذف تست‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نیست. بلکه این ابزارهای عددی برای کمی کردن اندازه‌گیرهای کارایی مورد نیاز هستند. تحلیل مدار علاوه بر ایجاد دیدگاهی بنیادی نسبت به چیدمان مدار، سبب تسریع فرآیند ارزیابی مدار و کاهش

فرآیند فلوتاسیون را می‌توان جدایش مبتنی بر سینتیک در نظر گرفت. در نتیجه، می‌توان P (بازیابی) را در مقابل نسبت  $k/k_{50}$  ترسیم کرد [۲۴].



شکل ۳: تابع توزیع احتمال برای جدایش مبتنی بر دانسیته [۶].

این شیب می‌تواند به‌طور ریاضی با گرفتن مشتق از نسبت کنسانتره به خوراک در  $Z=1$  به دست آید. این مشتق به‌صورت زیر است:

$$\frac{d(C/F)}{dZ} = \frac{dP}{dZ} \quad (1)$$

اکنون یک تحلیل مشابه از یک مدار دو مرحله‌ای رافر-کلینر نشان داده شده در شکل ۱(b) را در نظر بگیرید. در این حالت، خوراک داخلی مدار ( $F'$ ) به واحد رافر به‌صورت زیر است:

$$F' = F + M$$

که در آن F، کل خوراک ورودی به مدار ترکیبی و M جریان برگشتی مواد میانی از واحد کلینر است. جرم ذرات با یک ویژگی مشخص گزارش شده به جریان کنسانتره (C) یا مواد میانی (M) می‌تواند به‌صورت زیر محاسبه شود:

$$C = (P_2)(P_1)F' \quad (3)$$

$$M = (1 - P_2)(P_1)F' \quad (4)$$

با جای‌گذاری ساده جبری، نسبت کنسانتره به خوراک (C/F) برای این مدار می‌تواند به‌صورت زیر محاسبه شود:

$$\begin{array}{cccccc|cccc} w_2 & w_3 & w_4 & w_5 & w_6 & w_1 & & & & & \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & & & & & \\ -R_a & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ -(1-R_b) & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & -R_b & 1 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & -(1-R_b) & 0 & 1 & 0 & & & & & \end{array}$$

$$w_2 = w_1 + w_5$$

$$w_3 = R_a w_2$$

$$w_4 = (1 - R_a) w_2$$

$$w_5 = R_b w_4$$

$$w_6 = (1 - R_b) w_4$$

روابط بین گره و ماتریس مربوط به آن را می توان به صورت دستگاه  $AX=b$  در نظر گرفت که در آن  $A$  ماتریس مربعی نامنفرد (دارای معکوس) است. یکی از روش های حل این دستگاه استفاده از معکوس  $A$  است. ولی اغلب این روش پیشنهاد نمی شود زیرا محاسبه معکوس تابع زمان بر است. با استفاده از تابع  $\text{rref}$  نیز می توان پاسخ را به دست آورد. مزیت این تابع در این است که اگر دستگاه مربعی و منفرد باشد یا مربعی هم نباشد قابل استفاده است در صورتی که استفاده از تابع معکوس تنها با دستگاه نامنفرد قابل اعمال است. برای

حل معادلات بالا کد زیر در نرم افزار متلب پیاده شد:

```
M=[1 0 0 -1 0 -1;-R_a 1 0 0 0 0;-(1-R_b) 0 1 0 0 0;0 0 -R_b 1 0 0;0 0 -(1-R_b) 0 1 0];
N=rref(M);
for i=1:5
Sol(i) = -N(i,6);
end
A=Sol(1:5)
```

با حل معادلات بالا تابع انتقال مربوط به هر مسیر به دست می آید. با مشخص شدن تابع انتقال هر کدام از مسیرها علاوه بر محاسبه دقت جدایش می توان نسبت های جرمی و در نتیجه دبی فلز مربوط به هر جریان را محاسبه کرد:

$$w_2/w_1 = 1/k,$$

$$w_3/w_1 = R_a/k,$$

$$w_4/w_1 = -(R_a - 1)/k,$$

$$w_5/w_1 = -(R_b * (R_a - 1))/k,$$

$$w_6/w_1 = ((R_a - 1) * (R_b - 1))/k,$$

که در آن

$$k = (R_a * R_b - R_b + 1)$$

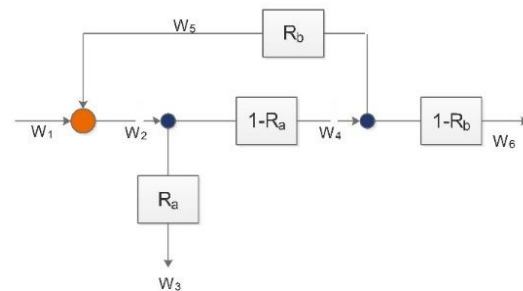
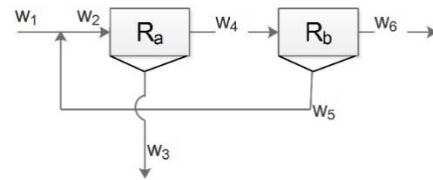
و  $w$ ، دبی جرمی کانی مورد نظر در یک جریان خاص می باشد.

دقت جدایش مدار با مشتق گیری از عبارت  $w_3/w_1$  در مقدار  $0/5$  به دست می آید. این مقدار برابر  $1/33$  می باشد. با افزایش تعداد مراحل به آسانی می توان دقت جدایش و همه دبی های جرمی یک مدار را محاسبه کرد.

حجم مطالعات آزمایشگاهی و شبیه سازی می شود. با افزایش تعداد مراحل جدایش، محاسبات دستی ارزیابی مدار دشوار خواهد شد. با پیاده سازی روابط تحلیل مدار در نرم افزار متلب امکان ارزیابی مدارهای با تعداد مراحل زیاد میسر می گردد.

### ۳- پیاده سازی در نرم افزار متلب

برای اجرای روش تحلیل مدار در نرم افزار متلب ابتدا چیدمان مدار به فرمت مناسب برای به دست آوردن روابط بین ورودی و خروجی هر بانک تغییر داده شد. به عنوان مثال، در شکل ۴ یک مدار جدایش دو مرحله ای رافر-رمق گیر و فرمت آن برای نوشتن معادلات ارائه شده است.



شکل ۴: مدار جدایش رافر-رمق گیر و دیاگرام بلوکی آن

با در نظر گرفتن بازیابی به عنوان تابع انتقال برای هر مرحله  $(R_a$  و  $R_b)$  این امکان فراهم می شود تا علاوه بر ارزیابی دقت جدایش مدار، دبی جرمی مواد در هر یک از جریان ها در مدار جدایش نیز بر اساس بازیابی های هر یک از مراحل تعیین شود. روابط بین گره ها و ماتریس مربوط به آن به صورت زیر است که در آن آخرین ستون مربوط به جریان ورودی است:

$$M = \frac{y_{out}}{y_{in}} = \sum_{k=1}^N \frac{M_k \cdot \Delta_k}{\Delta} \quad (7)$$

که در آن:

N: تعداد مسیرهای پیش‌رو بین گره ورودی و گره خروجی  
 $M_k$ : بهره kامین مسیر پیش‌رو بین گره ورودی و گره خروجی  
 دترمینان گراف ( $\Delta$ ) از معادله ۸ محاسبه می‌شود:

$$\Delta = 1 - \sum_i L_{i1} + \sum_j L_{j2} - \sum_k L_{k3} + \dots \quad (8)$$

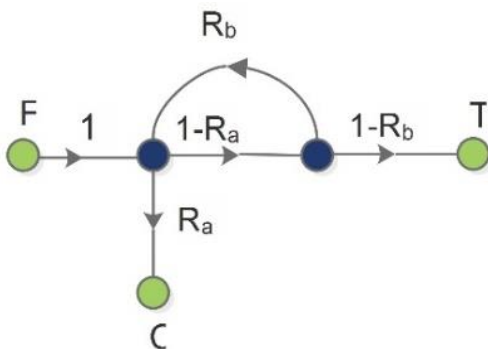
$\sum_i L_{i1}$  = مجموع بهره‌های تمام حلقه‌های مجزا

$\sum_j L_{j2}$  = مجموع ترکیب‌های دوتایی بهره‌های حلقه‌های مجزا

$\sum_k L_{k3}$  = مجموع ترکیب‌های سه تایی بهره‌های حلقه‌های مجزا

$\Delta_k$ : مقدار  $\Delta$  برای آن بخش از گراف جریان سیگنال که از مسیر kام مجزا می‌باشد.

با توسعه و ساده‌سازی روابط بین ورودی و خروجی مدار با استفاده از گراف‌های جریان سیگنال می‌توان روش تحلیل مدار و کارایی آن را ارزیابی کرد. مدار رافر-رمق‌گیر شکل ۴ را می‌توان در قالب گراف شکل ۵ ارائه کرد:



شکل ۵: گراف جریان سیگنال مدار رافر-رمق‌گیر

در این گراف تنها یک مسیر از خوراک به کنسانتره و یک حلقه نیز وجود دارد. در نتیجه با توجه به رابطه ۷ داریم:

$$M = \frac{C}{F} = \frac{R_a}{(R_a * R_b - R_b + 1)}$$

در اینجا F، C و T تناژ فلز هستند و نه تناژ جامد.

#### ۴- استفاده از گراف جریان سیگنال برای تحلیل مدار

ارزیابی دقت جدایش مدار تنها نیازمند دانستن رابطه بین خروجی و ورودی مدار است. در این حالت گراف جریان سیگنال به آسانی قابلیت انجام این محاسبات را دارد. گراف جریان سیگنال، حالت ساده شده‌ای از نمودار بلوک دیگرام است [۲۵]. اجزاء اصلی آن عبارتند از:

- ۱- گره‌ها: بیانگر متغیرهای سیستم هستند.
  - ۲- شاخه‌ها: متصل‌کننده گره‌ها (متغیرها) و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر.
- برخی از ویژگی‌های گراف جریان سیگنال:

- ۱- فقط در سیستم‌های خطی قابل اعمال کردن است.
- ۲- گره‌ها مشخص‌کننده متغیرهای سیستم می‌باشند.
- ۳- سیگنال‌ها فقط در جهت فلش می‌توانند از یک گره به گره دیگر منتقل شوند.

گره ورودی (چشمه<sup>۶</sup>): گرهی است که تنها شاخه خروجی دارد. مانند  $y_1$  در رابطه قبلی.

گره خروجی (چاه<sup>۷</sup>): گرهی است که تنها شاخه ورودی دارد. مانند  $y_2$ .

مسیر: یک مجموعه از شاخه‌ها که به‌صورت متوالی پشت سر هم واقع شده‌اند مسیر نامیده می‌شود.

مسیر پیش‌رو: مسیری است که از یک گره ورودی شروع شده و به یک گره خروجی ختم می‌شود.

بهره مسیر: حاصل ضرب بهره‌های واقع شده در یک مسیر است.

حلقه: مسیری است که از یک گره شروع شده و به همان گره ختم می‌شود و در طول این مسیر از گره بیش از یکبار عبور نمی‌کند.

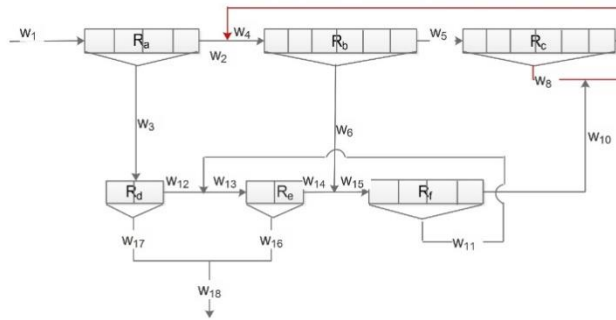
بهره حلقه: بهره مسیر یک حلقه، بهره حلقه نامیده می‌شود.

حلقه‌های مجزا: دو حلقه را در یک گراف جریان سیگنال مجزا گویند هرگاه هیچ گره مشترکی با یکدیگر نداشته باشند.

فرمول بهره میسون: یک گراف جریان سیگنال با N مسیر پیش‌رو و k حلقه را در نظر بگیرید. بهره بین گره ورودی و گره خروجی به‌صورت معادله ۷ خواهد بود:



اگر از نسبت به دست آمده در  $R=0.5$  مشتق گرفته شود مقدار  $1/49$  به دست می آید. همچنین با جایگزینی مقادیر بازیابی مربوط به هر یک از مراحل می توان نسبت جرمی جریان مورد نظر را به دست آورد. با محاسبات مشابه می توان میزان فلز در هر یک از جریان ها را به راحتی محاسبه کرد. اگر چیدمان مدار شکل ۶ تغییر داده شود و کنسانتره بانک C به جای ابتدای مدار به ابتدای بانک قبل از خود فرستاده شود (شکل ۸) به آسانی می توان محاسبات دقت جدایش و دبی جرمی فلز را برای چیدمان جدید انجام داد.



شکل ۸: چیدمان جدید مدار جدایش رافر-رمق گیر-شستشو

دقت جدایش برای چیدمان جدید  $2/2$  است. اگر در این شرایط بازیابی بانکها ثابت و همانند قبل باشد جدول موازنه جرم مواد در هر یک از جریانها به صورت جدول ۳ تغییر می کند:

جدول ۳: نسبت های جرمی و وزن فلز در جریان های مدار شکل ۸

جریان	$W_i/W_1$	وزن فلز	جریان	$W_i/W_1$	وزن فلز
$W_1$	۱	۴	$W_{10}$	$1/7982$	$7/1928$
$W_2$	$0.4$	$1/6$	$W_{11}$	$0.7707$	$3/0828$
$W_3$	$0.6$	$2/4$	$W_{12}$	$0.42$	$1/68$
$W_4$	$2/18925$	$11/57$	$W_{13}$	$1/1907$	$4/7628$
$W_5$	$1/1570$	$4/628$	$W_{14}$	$0.8335$	$3/334$
$W_6$	$1/7355$	$6/942$	$W_{15}$	$2/5690$	$10/276$
$W_7$	$0.4628$	$1/8512$	$W_{16}$	$0.3572$	$1/4288$
$W_8$	$0.6942$	$2/7768$	$W_{17}$	$0.18$	$0.72$
$W_9$	$2/4925$	$9/97$	$W_{18}$	$0.5372$	$2/1488$

درستی آزمایی:  $W_1 = W_{18} + W_7$

جدول ۲: نسبت های جرمی و وزن فلز در جریان های مدار شکل ۶

جریان	$W_i/W_1$	وزن فلز	جریان	$W_i/W_1$	وزن فلز
$W_1$	۱	۴	$W_{10}$	$1/0983$	$4/3932$
$W_2$	$2/3211$	$9/2844$	$W_{11}$	$0.4707$	$1/8828$
$W_3$	$1/3926$	$5/5704$	$W_{12}$	$0.9748$	$3/8992$
$W_4$	$0.9284$	$3/7136$	$W_{13}$	$1/4455$	$5/782$
$W_5$	$0.3714$	$1/4856$	$W_{14}$	$1/0119$	$4/0476$
$W_6$	$0.5570$	$2/228$	$W_{15}$	$1/5689$	$6/2756$
$W_7$	$0.1486$	$0.5944$	$W_{16}$	$0.4336$	$1/7344$
$W_8$	$0.2228$	$0.8912$	$W_{17}$	$0.4178$	$1/6712$
$W_9$	$1/3211$	$5/2844$	$W_{18}$	$0.8514$	$3/4056$

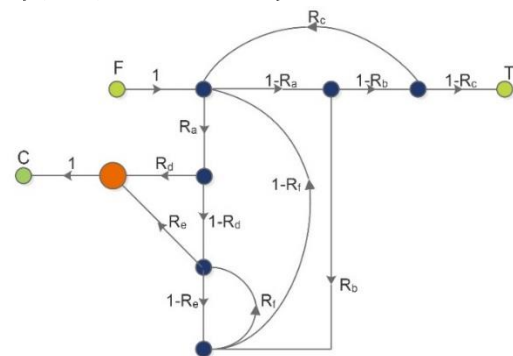
درستی آزمایی:  $W_1 = W_{18} + W_7$

با استفاده از نمودار جریان سیگنال و رابطه بهره میسون نیز می توان تابع انتقال هر کدام از مسیرها را به سرعت محاسبه کرد. برای محاسبه نسبت خروجی به ورودی، با توجه به شکل ۷، سه حلقه در مدار و سه مسیر برای رفتن از ورودی (F) به خروجی (C) وجود دارد. این محاسبات به صورت زیر است:

$$\frac{y_{out}}{y_{in}} = \frac{w_{18}}{w_1} = \sum_{k=1}^N \frac{M_k \cdot \Delta_k}{\Delta} = \frac{M_1 \Delta_1 + M_2 \Delta_2 + M_3 \Delta_3}{\Delta}$$

$$\frac{w_{18}}{w_1} = \frac{1 \times R_a \times R_d \times 1 \times [1 - R_f(1 - R_e)] + (1 - R_a) \times R_b \times R_f \times R_e \times 1 + R_a(1 - R_d) \times R_e \times 1}{k}$$

$$k = 1 - [R_c(1 - R_a)(1 - R_b) + R_a(1 - R_d)(1 - R_e)(1 - R_f) + R_f(1 - R_e) + (1 - R_a)R_b(1 - R_f)] + R_c(1 - R_a)(1 - R_b) \times R_f(1 - R_e)$$



شکل ۷: نمودار جریان سیگنال شکل ۶



شد که برای یک مدار جدایش در صورت مشخص بودن بازبایی مربوط به هر بانک و دبی فلز ورودی می‌توان به آسانی دبی فلز در هر یک از جریان‌ها را محاسبه کرد. بررسی‌های آینده بر روی داده‌های واقعی و معیارهای مرسوم تمرکز خواهد داشت.

### مراجع

- [1] Sepúlveda, F. D.; Luis A. Cisternas.; Maritza A. Elorza.; Edelmira D. Gálvez.; 2014; "A methodology for the conceptual design of concentration circuits: Group contribution method"; Computers & Chemical Engineering 63(0), 173-183.
- [2] Lynch, A. J.; 1981; "Mineral and coal flotation circuits: their simulation and control"; Amsterdam.
- [3] King, R.P.; 2001; "Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems"; second ed. SME, 492 pp.
- [4] Napier-Munn, T.J.; Lynch, A.J.; 1992; "The modelling and computer simulation of mineral treatment processes—current status and future trends"; Minerals engineering. 5(2), 143-167.
- [5] Mendez, D.A.; Gálvez, E.D.; Cisternas, L.A.; 2009; "State of the art in the conceptual design of flotation circuits"; International Journal of Mineral Processing, 90 (1), 1-15.
- [6] Meloy, T.; 1983a; "Analysis and optimization of mineral processing and coal-cleaning circuits – circuit analysis"; International Journal of Mineral Processing, 10, 61-72.
- [7] Meloy, T.; 1983b; "Optimizing for grade or profit in mineral processing circuits – circuit analysis"; International Journal of Mineral Processing, 11, 89-99.
- [8] Williams, M.; Meloy, T.; 1983; "Dynamic model of flotation cell banks – circuit analysis"; International Journal of Mineral Processing, 10, 141-160.
- [9] Harris, C.; Cuadros-Paz, A.; 1978; "Species interaction in flotation: a laboratory-scale semi-batch study"; International Journal of Mineral Processing, 5 (3), 267-283.
- [10] Williams, M.; Fuerstenau, D.; Meloy, T.; 1986; "Circuit analysis – general product equations for multifeed, multistage circuits containing variable selectivity functions"; International Journal of Mineral Processing, 17, 99-111.

محاسبات نشان می‌دهد که برای چیدمان جدید مقدار دقت جدایش از ۱/۴۹ به ۲/۲ افزایش یافت در حالی که بازبایی کلی مدار از ۸۵/۱۴ به ۵۳/۷۲ کاهش داشت. این محاسبات در حالتی انجام شد که بعد از تغییر چیدمان، بازبایی هر یک از مراحل بدون تغییر باقی بماند. بررسی تأثیر تغییر بازبایی - ها بر روی بازبایی کلی چیدمان جدید (جدول ۴) نشان می‌دهد که در کنار روش تحلیل مدار و بررسی دقت جدایش باید معیارهای دیگر نیز ارزیابی شود.

جدول ۴: تاثیر بازبایی مراحل بر روی بازبایی شبکه جدایش

بازبایی مدار	بازبایی مراحل	ردیف
۶۰/۵۷	$R_a=R_b=0.7, R_c=0.5, R_d=R_e=R_f=0.3$	۱
۷۴/۸۳	$R_a=R_b=0.7, R_c=0.5, R_d=R_e=R_f=0.4$	۲
۶۳/۷۲	$R_a=R_b=0.7, R_c=0.6, R_d=R_e=R_f=0.3$	۳
۷۷/۶۱	$R_a=R_b=0.7, R_c=0.6, R_d=R_e=R_f=0.4$	۴
۸۶/۲۴	$R_a=R_b=0.8, R_c=0.6, R_d=R_e=R_f=0.3$	۵

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تحلیل مدار به‌عنوان روشی برای ارزیابی چیدمان مدارهای جدایش معرفی شد. با افزایش تعداد مراحل و افزایش حجم محاسبات دستی، ارزیابی تحلیلی مدار دشوار خواهد بود. در نتیجه علاوه بر پیاده‌سازی روش تحلیل مدار در نرم‌افزار متلب، از نمودارهای جریان سیگنال و روش میسون برای محاسبه تابع انتقال کلی مدار استفاده گردید. راهکارهای ارائه شده امکان محاسبه آسان و سریع نسبت خروجی به ورودی را فراهم می‌کنند. در یک بررسی موردی نشان داده شد که اصلاح ساختار مدار جدایش می‌تواند منجر به افزایش دقت جدایش مدار شود. با اصلاح چیدمان مقدار دقت جدایش مدار از ۱/۴۹ به ۲/۲ افزایش یافت. در عین حال نشان داده شد که نیاز است تا در کنار معیار دقت جدایش معیارهای دیگر از جمله بازبایی کلی شبکه جدایش نیز مد نظر قرار گیرد. همچنین نشان داده

- [23] Noble, A.; & Luttrell, G. H; (2014); "The matrix reduction algorithm for solving separation circuits"; *Minerals Engineering*, 64, 97-108.
- [24] Loveday, B. K.; Brouckaert, C. J; (1995); "An analysis of flotation circuit design principles"; *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, 59(1), 15-21.
- [25] Henley, E. J., & Williams, R. A. (1973). "Graph Theory in Modern Engineering": *Computer Aided Design, Optimization, Reliability Analysis*, 8-21.

پی نوشت

- 
- <sup>1</sup> Unit operations  
<sup>2</sup> Score  
<sup>3</sup> cell loading  
<sup>4</sup> Cut-point  
<sup>5</sup> Sharper  
<sup>6</sup> Source  
<sup>7</sup> sink

- [11] Meloy, T.; Clark, N.; Glista, J.J.; 1986; "Effect of density variations in heavy-media rougher-cleaner-scavenger cells – circuit analysis"; *International Journal of Mineral Processing*, 16, 169–178.
- [12] Williams, M.; Meloy, T.; 1989; "On the definition and separation of fundamental process functions"; *International Journal of Mineral Processing*, 26, 65–72.
- [13] Williams, M.; Meloy, T.; 1991; "Feasible designs for separation networks: a selection technique"; *International Journal of Mineral Processing*, 32, 161–174.
- [14] Williams, M.; Fuerstenau, D.; Meloy, T.; 1992; "A graph-theoretic approach to process plant design"; *International Journal of Mineral Processing*, 36, 1–8.
- [15] Luttrell, G.H.; Kohmuench, J.N.; Stanley, F.L.; Trump, G.D.; 1998; "Improving spiral performance using circuit analysis"; *Minerals & metallurgical processing*, 15 (4), 16–21.
- [16] Tao, D.; Luttrell, G.; Yoon, R.-H.; 2000; "An experimental investigation on column flotation circuit configuration"; *International Journal of Mineral Processing*, 60, 37–56.
- [17] Luttrell, G.H.; Forrest, W.R.; Mankosa, M.J.; 2002; "Development of an ideal separation curve for dry beneficiation"; Preprint No. 02-178, 2002 SME Annual Meeting and Exhibit, 8 pp.
- [18] McKeon, T.; Luttrell, G.H.; 2012; "Optimization of multistage circuits for gravity concentration of heavy mineral sands"; *Minerals & metallurgical processing*, 29 (1), 1–5.
- [19] Yingling, J.; 1990; "Circuit analysis: optimizing mineral processing flowsheet layouts and steady state control specifications"; *International Journal of Mineral Processing*, 29, 149–174.
- [20] Yingling, J.; 1993a; "Parameter and configuration optimization of flotation circuits, Part I, A review of prior work"; *International Journal of Mineral Processing*, 38, 21–40.
- [21] Yingling, J.; 1993b; "Parameter and configuration optimization of flotation circuits, Part II, A new approach"; *International Journal of Mineral Processing*, 38, 41–66.
- [22] Lucay, F.; Mellado, M.E.; Cisternas, L.A.; Galvez, E.D.; 2012; "Sensitivity analysis of separation circuits"; *International Journal of Mineral Processing*, 110–111, 30–45.