نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن" Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)

دوره یازدهم، شماره ۳۲، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۱۱۹ تا ۱۲۸ Vol.11, No. 32, 2016, pp119-128

ارزیابی چیدمان مدارهای فلوتاسیون با تلفیق روش تحلیل مدارخطی و نمودار جریان سیگنال، درکارخانه مس قلعه زری وحید رادمهر^۱؛ سیدضیاءالدین شفائی تنکابنی^۲؛ محمد نوعپرست^۳؛ هادی عبداللهی^۴

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

+- استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تهران، H_abdollahi@ut.ac.ir

(دریافت ۱۳ اردیبهشت ۱۳۹۴، پذیرش ۳ مرداد ۱۳۹۵)

چکیدہ

در مدارهای فر آوری مواد معدنی، از جدایش مرحلهای برای تولید محصولی با بازیابی و کیفیت مناسب استفاده می شود. چون به طور معمول، سالانه میلیون ها تن ماده معدنی در این مدارها تحت عملیات پرعیار سازی قرار می گیرد، دستیابی به بهبودی اندک از طریق تغییر در چیدمان مدار می تواند تاثیر اقتصادی قابل توجهی داشته باشد. همچنین چون برای یک مدار جدایش، طرحهای مختلفی وجود دارد یافتن بهترین ترکیب از طریق انجام آزمایش، زمان بر و پرهزینه است. در این تحقیق، از اصول تحلیل مدار برای ایجاد ار تباط ریاضی بین مراحل مختلف در مدارهای فر آوری استفاده شده است. در این تحقیق، از اصول تعلیل مدار 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 پیاده سازی روش تحلیل مدار در نرمافزار متلب، گرافهای مدن روش تحلیل مدار شده است؛ برای تسریع در انجام محاسبات، علاوه بر پیاده سازی روش تعلیل مدار در نرمافزار متلب، گرافهای مدارهای با تعداد مراحل زیاد و پیچیده بررسی شود. روش پیشنهادی بر روی یک مدار با ۶ مرحله پرعیارسازی پیاده شد تا چیدمان مدارهای با تعداد مراحل زیاد و پیچیده بررسی شود. روش پیشنهادی بر روی یک مدار با ۶ مرحله پرعیارسازی پیاده شد. با اصلاح چیدمان مداره ای اعداد مراحل زیاد و پیچیده بررسی شود. روش پیشنهادی بر روی یک مدار با ۶ مرحله پرعیارسازی پیاده شد. با اصلاح چیدمان مداره دقت جدایش از ۱۹۴۹ به ۲/۲ افزایش یافت. این افزایش می تواند 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 می توان دبی فلز در هر یک از جریانها

كلمات كليدي

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

«نويسنده مسئول مكاتبات

نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن

۱– مقدمه

مدارهای جدایش مواد معدنی بهطور معمول برای تغلیظ دامنه وسیعی از کانیها استفاده می شوند. همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می شود در جدایش به روش فلوتاسیون، پارامترهای مختلفی نقش دارند که امکان مطالعه همه پارامترها در یک زمان وجود ندارد [۱].



شکل ۱: مهم ترین مؤلفهها و پارامترهای تأثیر گذار در مدارهای فلوتاسیون [1].

طراحی مدارهای فرآوری موضوعی گسترده است و در طرح نهایی باید تعداد و نوع واحدهای عملیاتی و چیدمان مدار مشخص شود. با توجه به حجمهای جریان زیاد، هزینههای سرمایه گذاری 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 شبیه سازی محاسباتی کمک گرفته شد. از زمان آغاز این موضوع، مدلهای فرآیند از برازش منحنی بر داده-های تجربی به سمت مدلهای پدیده شناختی و مدلهای پیش بینی 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 نامناسب باشد، ممکن است فرآیند نیازمند فلوشیت بایگزین 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 نمی کند.

یکی از ابزارهای طراحی و ارزیابی اولیه مدار، تحلیل مدار است [۸-۶]. این روش از اصول بنیادی جدایش برای تحلیل چیدمان و اتصال واحدهای عملیاتی استفاده می کند. ارزیابی تحلیلی مدار در نهایت امتیازی^۲ را برای کارایی جدایش نسبی یک مدار نسبت به مدارهای دیگر فراهم می کند. 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 می کند. نشان داده شده است استفاده از محاسبات جبری به دست آید [۶]. در ادامه از این عبارت تحلیلی به دست آمده برای ارزیابی مدار استفاده می-شود. 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 (a)۲ 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



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 مخصول نرمالشده (Z) با SG/SG₅₀ توسط نشان میدهد. حد جدایش⁴ وزن مخصوص (SG₅₀) توسط مقدار 1 = Z که در آن 0.5 = P است بیان میشود. چون منحنی با شیب بیشتر نشاندهنده جدایش دقیق تر⁶ است، شیب منحنی جدایش ارزیابی شده در 1 = Z 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. محدوديت روش تحليل مدار به واسطه فرض خطى بودن است. بهطور خلاصه خطی بودن بیان میکند که منحنی جدایش یک واحد عملیاتی تحت تأثیر ترکیب یا نرخ خوراک ورودی به آن قرار نمی گیرد. با این که این فرض برای همه واحدهای عملیاتی معتبر نیست، تحقیقات انجام شده از عملكرد خطى واحدهاى عملياتي حمايت كرده و بررسيهاي تجربی، خطی بودن را در برخی موارد تأیید کرده است [۹-٧]. تحقيقات قبلى اين ادعاها را از طريق مطالعات تئورى، آزمایشگاهی و صنعتی تأیید کرده است. این مثالها شامل بهینه سازی عیار -بازیابی [۷]، تحلیل دینامیکی کارایی سلول فلوتاسیون [۸]، جدایشهای چند مرحلهای با خوراک C چندگانه [۱۰]، بارگیری سلول^۳ رافر-رمق گیر-کلینر [۱۱]، تعاريف بنيادي تابع فرآيند [١٢] و جوابهاي موجه طراحي [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 كردند. همه مطالعات مذكور بهطور مستقيم يا 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 شبیهساز مدار [۲۳] استفاده كردند. این كاربرد وسیع بهطور گسترده نشاندهنده مفید بودن حل تحليلي مدار است. با افزايش تعداد مراحل استفاده از روش تحلیل مدار دشوار شده و نیازمند محاسبات فراوان می باشد. در نتیجه در این تحقیق موارد زیر ارائه شده است:

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

۲– تحلیل مدار

فرآیند فلوتاسیون را میتوان جدایش مبتنی بر سینتیک در نظر گرفت. در نتیجه، میتوان P (بازیابی) را در مقابل نسبت k/k₅₀ 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 بهدست آید. این مشتق بهصورت زیر است:

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

اکنون یک تحلیل مشابه از یک مدار دو مرحلهای رافر-کلینر نشان داده شده در شکل (۱) را در نظر بگیرید. در این حالت، خوراک داخلی مدار ([´]F) به واحد رافر بهصورت زیر (۲)

$$F' = F + M$$

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 به صورت زیر محاسبه شود:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{P}_2)(\mathbf{P}_1) \mathbf{F}' \tag{(Y)}$$

$$\mathbf{M} = (1 - \mathbf{P}_2)(\mathbf{P}_1) \mathbf{F}'$$
 (*)

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

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 بهدست آید. با توجه به اینکه در 2=1 داریم P=0.5، رابطه زیر بهدست میآید:

$$\frac{\mathrm{d}(\mathrm{C}/\mathrm{F})}{\mathrm{d}\mathrm{Z}} = \left(\frac{2\mathrm{P}-\mathrm{P}^2}{\left(\mathrm{P}^2-\mathrm{P}+1\right)^2}\right)\frac{\mathrm{d}\mathrm{P}}{\mathrm{d}\mathrm{Z}} = 1.33\frac{\mathrm{d}\mathrm{P}}{\mathrm{d}\mathrm{Z}} \tag{9}$$

مقایسه معادلات ۱ و ۶، نشان می دهد که دقت جدایش برای مدار رافر-کلینر به طور تئوری ۱/۳۳ بار بالاتر از این مقدار برای یک مدار تک مرحله ای است. با استفاده از این شیوه یکسان، دقت جدایش نسبی دیگر چیدمان های مدار نیز می-تواند تعیین شود. چیدمان استاندارد رافر-کلینر (شکل (۵)۱) و چیدمان رافر-اسکونجر (شکل (۵)۱) هر کدام داری یک دقت جدایش نسبی هستند که ۱/۳۳ بار بزرگتر از فرآیند تکمرحله ای است. چیدمان رافر-اسکونجر-کلینر (شکل (۱)() حاوی سه مرحله کلی، دارای دقت جدایش ۲ بار بزرگتر از فرآیند تک مرحله ای است. البته جای شگفتی است که برخی مداره ای چند مرحله ای نسبت به فرآیند تک

مرحلهای دارای جدایش بهتری نیستند (شکل ۱۴ و ۱۴). 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 می-تواند 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 آزمایشگاهی و شبیهسازی نیست. بلکه این ابزارهای عددی این حال کاربرد تحلیل مدار به معنای حذف تستهای آزمایشگاهی و شبیهسازی نیست. بلکه این ابزارهای عددی تحلیل مدار علاوه بر ایجاد دیدگاهی بنیادی نسبت به نشريه علمى- پژوهشى مهندسى معدن

W_2	W_3	W_4	W_5	W ₆	$W_1 = W + W$
1	0	0	-1	0	-1 $w_2 - w_1 + w_5$
$-R_a$	1	0	0	0	$w_3 = R_a w_2$
$-(1-R_a)$	0	1	0	0	$w_4 = (1 - R_a)w_2$
0	0	$-R_b$	1	0	$0 w_5 = R_b w_4$
0	0	$-(1-R_b)$	0	1	$0 w_6 = (1 - R_b) w_4$

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 روشهای حل این دستگاه استفاده از معکوس A است. ولی اغلب این روش ییشنهاد نمی شود زیرا محاسبه معکوس تابع زمان بر است. با استفاده از تابع 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 نرمافزار متلب پیاده شد: $M = [1 0 0 - 1 0 - 1; R_{a} 1 0 0 0; (1 - R_{a}) 0 1 0 0; 0 0; Rb 1 0$ $0;0 0 - (1-R_b) 0 1 0];$ 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 مسير بهدست میآید. با مشخص شدن تابع انتقال هر کدام از مسیرها علاوه بر محاسبه دقت جدایش می توان نسبتهای جرمی و در نتیجه دبی فلز مربوط به هر جریان را محاسبه کرد: $w_2/w_1 = 1/k$, $w_3/w_1 = R_a/k$, $w_4/w_1 = - (R_a - 1)/k$, $w_5/w_1 = - (R_h^*(R_a - 1))/k$, $w_6/w_1 = ((R_a - 1)*(R_b - 1))/k,$ 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 w₃/w₁ در مقدار ۵/۰ بهدست می آید. این مقدار برابر ۱/۳۳ می باشد. با افزایش تعداد مراحل به آسانی می توان دقت جدایش و همه دبیهای حجم مطالعات آزمایشگاهی و شبیهسازی می شود. با افزایش تعداد مراحل جدایش، محاسبات دستی ارزیابی مدار دشوار خواهد شد. با پیادهسازی روابط تحلیل مدار در نرمافزار متلب امکان ارزیابی مدارهای با تعداد مراحل زیاد میسر می-گردد.

۳- پیادهسازی در نرمافزار متلب

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



شکل ۴: مدار جدایش رافر-رمق گیر و دیا گرام 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 جریانها در مدار جدایش نیز بر اساس بازیابی های هر یک از مراحل تعیین شود. روابط بین گرهها و ماتریس مربوط به آن به صورت زیر است که در آن آخرین ستون مربوط به جریان ورودی است:

جرمی یک مدار را محاسبه کرد.

۴- استفاده از گراف جریان سیگنال برای تحلیل مدار

ارزيابى دقت جدايش مدار تنها نيازمند دانستن رابطه بين 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 دیاگرام است [۲۵]. اجزاء اصلي آن عبارتند از: گرەھا: بیانگر متغیرهای سیستم هستند. ۲- شاخهها: متصل کننده گرهها (متغیرها) و نحوه ارتباط آنها با یکدیگر. برخی از ویژگیهای گراف جریان سیگنال: ۱- فقط در سیستمهای خطی قابل اعمال کردن ۲- گردها مشخص کننده متغیرهای سیستم می باشند. ۳- سیگنالها فقط در جهت فلش می توانند از یک گره به گره دیگر منتقل شوند. گره ورودی (چشمه): گرهی است که تنها شاخه خروجی دارد. مانند y₁ در رابطه قبلی. گره خروجی (چاه[°]): گرهی است که تنها شاخه ورودی دارد. مانند ₂.y مسیر: یک مجموعه از شاخهها که بهصورت متوالی پشت سر هم واقع شدهاند مسير ناميده مي شود. مسیر پیشرو: مسیری است که از یک گره ورودی شروع شده و به یک گره خروجی ختم میشود. بهره مسیر: حاصلضرب بهرههای واقعشده در یک مسیر است. حلقه: مسیری است که از یک گره شروع شده و به همان گره ختم می شود و در طول این مسیر از گره بیش از یکبار عبور نمى كند. بهره حلقه: بهره مسير يک حلقه، بهره حلقه ناميده مي شود. حلقههای مجزا: دو حلقه را در یک گراف جریان سیگنال مجزا گویند هرگاه هیچ گره مشترکی با یکدگر نداشته ىاشند. 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:

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{y}_{\text{out}}}{\mathbf{y}_{\text{in}}} = \sum_{k=1}^{N} \frac{\mathbf{M}_{k} \cdot \Delta_{k}}{\Delta}$$
(Y)

ر کی N: تعداد مسیرهای پیشرو بین گره ورودی و گره خروجی M_k: بهره kامین مسیر پیشرو بین گره ورودی و گره خروجی دترمینان گراف (Δ) از معادله ۸ محاسبه می شود:

$$\Delta = 1 - \sum_{i} L_{i1} + \sum_{j} L_{j2} - \sum_{k} L_{k3} + \dots$$
 (A)

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

حلقههای حلقههای دوتایی بهرههای حلقههای =
$$\sum_j L_{j2}$$

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

∆: مقدار ∆ 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-رمق گیر شکل ۴ را میتوان در قالب گراف شکل ۵ ارائه کرد:



شکل ۵: گراف جریان سیگنال مدار رافر –رمق گیر

در این گراف تنها یک مسیر از خوراک به کنسانتره و یک حلقه نیز وجود دارد. در نتیجه با توجه به رابطه ۷ داریم: $M = \frac{C}{F} = \frac{R_a}{\left(R_a * R_b - R_b + 1\right)}$ در اینجا C ،F و T تناژ فلز هستند و نه تناژ جامد.

نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن

۵- مطالعه موردی

برای نشان دادن کارایی راهکارهای پیشنهادی برای حل تحلیلی مدارهای جدایش، یک مدار جدایش فرضی بررسی شده است (شکل ۶). این مدار شامل مراحل رافر (R_a و R_b)، رمق گیر (R_c) و شستشو (R_f a و R_f) است.



شکل ۶: مدار جدایش رافر-رمق گیر-شستشو ودیاگرام بلوکی آن

معادلات و ماتریس مربوط به آن بهصورت زیر است:

$w_2 = w_1 + w_9$	$W_6 = R_b W_4$	$w_{10} = (1 - R_f) w_{15}$	$w_{14} = (1 - R_e) w_{13}$
$w_3 = w_2 R_a$	$w_{\gamma} = (1 - R_c) w_5$	$W_{11} = R_f W_{15}$	$w_{15} = w_6 + w_{14} w_{18} = w_{16} + w_{17}$
$w_4 = (1 - R_a)w_2$	$W_8 = R_c W_5$	$w_{12} = (1 - R_d) w_3$	$w_{16} = \mathbf{R}_{e} w_{13}$
$w_5 = (1 - R_b)w_4$	$w_9 = w_8 + w_{10}$	$w_{13} = w_{11} + w_{12}$	$w_{17} = R_d w_3$

<i>W</i> ₂	W3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	<i>W</i> ₁₀	<i>W</i> ₁₁	<i>w</i> ₁₂	W ₁₃	<i>w</i> ₁₄	W ₁₅	W ₁₆	W ₁₇	W ₁₈	W
1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
-R _a	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-(1-R _a)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	$-(1-R_{b})$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	$-R_{b}$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	$-(1-R_{c})$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-R _c	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	$-(1-R_{f})$	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	$-R_{f}$	0	0	0	0
0	$-(1-R_d)$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-(1-R_e)$	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-R _e	0	0	1	0	0	0
0	$-R_{d}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	1	0

با پیادہسازی در نرمافزار متلب داریم:

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 -R 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 -(1-R) 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 -R 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 -R 0 0 0 0;0 -(1-R) 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0000;00000000-1-1100000;000000000-(1-R) 1 0 0 0 0;0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 -1 1 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0000000-1-110]; N=rref(M); for i=1:17 Sol(i) = -N(i, 18);end A=Sol(17); diff(A); subs(ans,0.5)

رابطه بین خروجی و ورودی به صورت زیر به دست می آید: $(R^2*(R-2))/(R^5-4*R^4+8*R^3-9*R^2+4*R-1))$

در نتیجه با مشتق گیری در A^{-1} ، مقدار دقت جدایش در نتیجه با مشتق گیری در A^{-1} ، مقدار دقت جدایش A^{-1} به دست می آید. اگر تناژ خوراک ورودی به مدار جدایش شکل ۶، ۲۰۰ تن بر ساعت با عیار ۲ درصد در نظر \mathcal{R}_{c} نظر موا و در شرایط عملیاتی ثابت، بازیابی کانی باارزش در مراحل رافر (R_{c} ه R_{d}) و شستشو (R_{c} ه (R_{c}) و شستشو (R_{c} ه جریان فلز در مراحل رافر در مدار جدایش به صورت جدول ۲ قابل جریان های مختلف در مدار جدایش به صورت جدول ۲ قابل محاسبه است.

۶ ر	شكل	مدار	جريانهاى	فلز در	جرمي و وزن	، ۲: نسبتهای	جدول
-----	-----	------	----------	--------	------------	--------------	------

وزن فلز	w_i / w_1	جريان	وزن فلز	w_i / w_1	جريان			
4/3977	١/• ٩٨٣	W ₁₀	۴	١	W_1			
1/8828	•/41•1	w ₁₁	9/7744	2/2211	W ₂			
٣/٨٩٩٢	•/9748	W ₁₂	۵/۵۷۰۴	1/3978	W ₃			
۵/۷۸۲	1/4400	W ₁₃	۳/۷۱۳۶	•/9784	W_4			
4/0479	١/• ١ ١٩	W ₁₄	1/4208	•/7714	W ₅			
8/2028	1/0889	W ₁₅	۲/۲۲۸	•/۵۵V•	W ₆			
1/1746	•/۴۳۳۶	W ₁₆	•/6944	•/1488	W ₇			
1/8818	•/۴۱۷۸	W ₁₇	٠/٨٩١٢	•/7778	W ₈			
3/4008	•/2014	W ₁₈	0/7144	1/8811	W9			
درستی آزمایی: w ₁ = w ₁₈ + w ₇								

با استفاده از نمودار جریان سیگنال و رابطه بهره میسون نیز میتوان 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 بهصورت زیر است:

$$\frac{\mathbf{y}_{out}}{\mathbf{y}_{in}} = \frac{w_{18}}{w_{1}} = \sum_{k=1}^{N} \frac{\mathbf{M}_{k} \cdot \Delta_{k}}{\Delta} = \frac{\mathbf{M}_{1} \Delta_{1} + \mathbf{M}_{2} \Delta_{2} + \mathbf{M}_{3} \Delta_{3}}{\Delta}$$

$$\frac{w_{18}}{w_{1}} = \frac{1 \times \mathbf{R}_{a} \times \mathbf{R}_{d} \times 1 \times [1 - \mathbf{R}_{f} (1 - \mathbf{R}_{e})] + (1 - \mathbf{R}_{a}) \times \mathbf{R}_{b} \times \mathbf{R}_{f} \times \mathbf{R}_{e} \times 1 + \mathbf{R}_{a} (1 - \mathbf{R}_{d}) \times \mathbf{R}_{e} \times 1}{\mathbf{k}}$$

$$k = 1 - [\mathbf{R}_{c} (1 - \mathbf{R}_{a}) (1 - \mathbf{R}_{b}) + \mathbf{R}_{a} (1 - \mathbf{R}_{d}) (1 - \mathbf{R}_{e}) (1 - \mathbf{R}_{f}) + \mathbf{R}_{f} (1 - \mathbf{R}_{e}) + (1 - \mathbf{R}_{a}) \mathbf{R}_{b} (1 - \mathbf{R}_{f})] + \mathbf{R}_{c} (1 - \mathbf{R}_{a}) (1 - \mathbf{R}_{b}) \times \mathbf{R}_{f} (1 - \mathbf{R}_{e})$$

$$F = \frac{1}{\mathbf{R}_{d}} + \frac{1 - \mathbf{R}_{e}}{\mathbf{R}_{d}} + \frac{1 - \mathbf{R}_{e}}{\mathbf{R}_{d}} + \frac{1 - \mathbf{R}_{e}}{\mathbf{R}_{b}} + \frac{1 - \mathbf{R}_{e}}{\mathbf{R}_{b}} + \frac{1 - \mathbf{R}_{e}}{\mathbf{R}_{b}} + \frac{\mathbf{R}_{e}}{\mathbf{R}_{b}} + \frac{1 - \mathbf{R}_{e}}{\mathbf{R}_{b}} + \frac{\mathbf{R}_{e}}{\mathbf{R}_{b}} + \frac{\mathbf{R}_{e}}{\mathbf{R}_$$

شکل ۷: نمودار جریان سیگنال شکل ۶

اگر از نسبت بهدست آمده در ۵/۰=R مشتق گرفته شود مقدار ۱/۴۹ بهدست میآید. همچنین با جایگزینی مقادیر بازیابی مربوط به هر یک از مراحل میتوان نسبت جرمی جریان مورد نظر را بهدست آورد. با محاسبات مشابه میتوان میزان فلز در هر یک از جریانها 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) بهآسانی میتوان 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 ۲/۲ 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:

وزن فلز	w_i / w_1	جريان	وزن فلز	w_i / w_1	جريان			
Y/197A	١/٧٩٨٢	w ₁₀	۴	١	\mathbf{W}_1			
۳/۰۸۲۸	•/\\\•\	w ₁₁	۱/۶	۰/۴	W ₂			
١/۶٨	•/47	W ₁₂	۲/۴	• 8	W ₃			
4/7828	١/١٩٠٧	W ₁₃	11/04	۲/۸۹۲۵	W_4			
٣/٣٣۴	•/٨٣٣۵	W ₁₄	4/828	1/107.	W ₅			
1./278	۲/۵۶۹۰	W ₁₅	8/947	1/2800	w ₆			
1/4278	·/WAVY	W ₁₆	1/8017	•/4978	W_7			
•/٧٢	•/\X	W ₁₇	2/2768	•/۶947	W ₈			
۲/۱۴۸۸	•/۵۳۷۲	W ₁₈	९/९४	2/4920	W9			
درستی آزمایی: w _l = w ₁₈ + w ₇								

جدول ۳: نسبتهای جرمی و وزن فلز در جریانهای مدار شکل ۸

نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن

شد که برای یک مدار جدایش در صورت مشخص بودن بازیابی 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. Elorzaa.; 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 بازیابی کلی مدار از ۸۵/۱۴ به ۵۳/۷۲ کاهش داشت. این محاسبات در حالتی انجام شد که بعد از تغییر چیدمان، بازیابی هر یک از مراحل بدون تغییر باقی بماند. بررسی تأثیر تغییر بازیابی-ها بر روی بازیابی کلی چیدمان جدید (جدول ۴) نشان می-دهد که در کنار روش تحلیل مدار و بررسی دقت جدایش باید معیارهای دیگر نیز ارزیابی شود.

جدول ۴: تاثیر بازیابی مراحل بر روی بازیابی شبکه جدایش

بازیابی مدار	بازیابی مراحل	رديف
۶۰/۵۲	$R_{a=}R_{b}=\cdot/\forall, R_{c}=\cdot/\Delta, R_{d=}R_{e=}R_{f}=\cdot/\forall$	١
۷۴/۸۳	$R_{a=}R_{b}=\cdot/Y, R_{c}=\cdot/\Delta, R_{d=}R_{e=}R_{f}=\cdot/F$	٢
83/12	$R_{a=}R_{b}=\cdot/Y, R_{c}=\cdot/\mathcal{P}, R_{d=}R_{e=}R_{f}=\cdot/\mathbb{V}$	٣
۲۲/۶۱	$R_{a=}R_{b}=\cdot/Y, R_{c}=\cdot/\mathcal{P}, R_{d=}R_{e=}R_{f}=\cdot/\mathcal{P}$	۴
18/26	$R_{a=}R_{b}=\boldsymbol{\cdot}/\boldsymbol{\lambda}, R_{c}=\boldsymbol{\cdot}/\boldsymbol{\mathcal{P}}, \ R_{d=}\ R_{e=}\ R_{f}=\boldsymbol{\cdot}/\boldsymbol{\boldsymbol{\nabla}}$	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 می-تواند 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 بازیابی 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.

پىنوشت

¹ Unit operations

نشر يه علمى-پژوهشى مهندسى معدن

- ² Score
- ³ cell loading
- ⁴ Cut-point
- ⁵ Sharper
- ⁶ Source
- ⁷ 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.