

## ارائه روشی برای بررسی ساختار سیستم اندازه‌گیری مدارهای پیچیده کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی - استخراج بخش قابل مشاهده و انجام موازنه جرم

فردیس نخعی<sup>۱</sup>، علی اکبر عبدالله زاده<sup>۲</sup> و مهدی ایران نژاد<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت اسفند ۹۱، پذیرش اسفند ۹۲)

### چکیده

برای انجام محاسبات متالورژیکی، اقتصادی و کنترل روند عملکرد کارخانه، در اختیار داشتن اطلاعات کافی و صحیح از بخش‌های مختلف و به خصوص جریان‌های مواد ضروری است. معمولاً به دلایل فنی یا اقتصادی امکان اندازه‌گیری یا نمونه‌برداری از تمام جریان‌های موجود در مدار وجود ندارد و از طرفی به علت طبیعت کار ابزار اندازه‌گیری در کارخانه و یا فرآیندهای نمونه‌برداری و آنالیز، داده‌های جمع‌آوری شده با خود خطای غیر قابل اجتناب را به همراه دارد، لذا به کارگیری روش‌های مختلف تعدیل خطاها، تحت مدل‌های دقیق از جمله موازنه جرم و دست‌یابی به داده‌های صحیح الزامی است. در این مقاله با توجه به سیستم اندازه‌گیری یا نمونه‌برداری در مدار واحد فرآوری مورد مطالعه، ضمن معرفی روشی نوین برای انجام موازنه جرم مدار در حالت چند متغیره، نتایج به‌کارگیری روش ماتریس سیکل‌های پایه برای بررسی سیستم اندازه‌گیری مورد استفاده از نظر میزان دسترسی به اطلاعات مورد نیاز و تعیین بخش‌های قابل مشاهده و غیر قابل مشاهده مدار ارائه شده است. به منظور اعتبار سنجی روش پیشنهادی کاربرد آن در مدار سولفورزدایی از کنسانتره شرکت سنگ آهن گل‌گهر تشریح شده است. نتایج نشان می‌دهد که، به کارگیری این آزمون از توانایی بالایی در بررسی صحت و تعدیل داده‌های جمع‌آوری شده برخوردار است و به دلیل ساختار مناسب آن در نرم افزار متلب، امکان مطالعه مدارهای با حجم محاسبات زیاد نیز فراهم است.

### کلمات کلیدی

موازنه جرم، ماتریس سیکل‌های پایه، اصلاح داده‌ها، قابل مشاهده، مدار سولفورزدایی گل‌گهر

## ۱- مقدمه

محل سنسور یا نمونه‌برداری از یک جریان دیگر تا حد زیادی می‌تواند کیفیت اندازه‌گیری را بهبود دهد، زیرا اصلاح در موقعیت حسگر و داشتن اطلاعات از یک جریان، شرایط قابل مشاهده بودن مدار را تغییر می‌دهد. از این رو متغیرها به چهار دسته تقسیم می‌شوند (شکل ۱):

- متغیرهای اندازه‌گیری نشده که با استفاده از مقادیر متغیرهای اندازه‌گیری شده قابل محاسبه هستند.
- متغیرهای اندازه‌گیری نشده که با استفاده از اطلاعات موجود قابل محاسبه نیستند.
- متغیرهای اندازه‌گیری شده که قابل اصلاح هستند.
- متغیرهای اندازه‌گیری شده که امکان اصلاح آن‌ها وجود ندارد.



شکل ۱: طبقه بندی متغیرهای فرآیند

مزایای فرآیند دسته‌بندی که تحلیل افزونگی نیز نامیده می‌شود عبارتند از:

- در مرحله طراحی فرآیند، دستیابی به اطلاعات مورد نظر را با انتخاب متغیرهای مناسب با هزینه بسیار کم ممکن می‌سازد.
  - پیش نیاز هر محاسبه موازنه‌ی جرمی که از داده‌های اضافی استفاده می‌کند، است.
  - بهترین مکان حسگرها و طراحی سیستم نمونه‌برداری را روشن می‌سازد.
- برای فرآیندهای تک مؤلفه‌ای (فقط بر حسب دبی) یک روش تئوری گراف برای طبقه‌بندی، درجه افزونگی و قابل مشاهده بودن متغیرها توسط Mah و همکاران در سال ۱۹۷۶ ارائه شد [۱]. سپس در سال ۱۹۸۸ الگوریتم دیگری برای دسته‌بندی مقادیر اندازه‌گیری نشده و قابل مشاهده یا غیر قابل مشاهده و افزونگی یا عدم افزونگی ارائه دادند [۲]. تحلیل کامل از این مسئله از لحاظ قابل مشاهده بودن و افزونگی سیستم، توسط Maquin و همکاران (۱۹۸۶) و

یک نیاز اساسی در طراحی نمونه‌برداری و محاسبات جرمی مدارهای فرآوری مواد معدنی محاسبه متغیرهای اندازه‌گیری نشده و تصحیح متغیرها بر اساس متغیرهای اندازه‌گیری شده فرآیند است. در این خصوص، دو سوال مهم در ارزیابی عیارها و نرخ‌های جریان در شرایط پایا (Steady state) به وجود می‌آید.

۱- آیا یک متغیر اندازه‌گیری نشده به طور انحصاری از داده‌های دیگر قابل محاسبه است (متغیر قابل مشاهده (Observable))؟

۲- آیا بدون داشتن اندازه‌گیری‌های اضافه (درجه افزونگی (Redundancy)) امکان اصلاح داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد؟

مدارهای فرآوری مواد معدنی از تعداد زیادی واحدهای فرآیند پیوسته در یک شبکه جریانی پیچیده تشکیل شده است. نرخ‌های جریان و کسرهای جرمی به طور معمول برای اهداف کنترل فرآیند و ارزیابی عملکرد فرآیند اندازه‌گیری می‌شوند و کیفیت داده‌ها تأثیر زیادی بر عملکرد کنترل فرآیند و کاربردهای بهینه‌سازی دارد.

داده‌های اندازه‌گیری شده همیشه دارای خطا (خطاهای تصادفی و سیستماتیک) هستند. خطاهای سیستماتیک از ناکارآمدی ابزار اندازه‌گیری و کالیبراسیون نادرست آن ناشی می‌شود. خطای تصادفی به رویدادهای اتفاقی ابزار نمونه‌گیری و تجهیزات اندازه‌گیری، نوسانات ویژگی‌های مواد و اختلالات خارجی مربوط می‌شود.

در بعضی موارد، تعداد معادلات افزونگی برای دستیابی به تشخیص مقادیر فرآیند کافی نیست. زمانی که اطلاعات دارای افزونگی باشد، با توجه به معادلات موازنه جرم و شبکه فرآیندی و استفاده از روش‌های اصلاح داده‌ها، تصحیح خطاهای اندازه‌گیری و به طور هم‌زمان تخمین متغیرهای اندازه‌گیری نشده ممکن می‌گردد.

تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام جریان اندازه‌گیری نشده باید توسط یک حسگر اندازه‌گیری شود، بسیار مهم است. مسئله قرارگیری حسگرها، جنبه‌های دیگری مانند تعداد و نوع را پوشش می‌دهد. در بسیاری از موارد، تغییر در

برنامه کامپیوتری کمینه‌سازی است که نرخ‌های جریان اندازه‌گیری نشده را با دقت خوبی برآورد می‌کند و داده‌های خطادار را تصحیح و میزان اعتبار نتایج خود را تخمین می‌زند [۹]. در این مقاله ضمن ارائه موازنه‌ی جرم یک واحد فرآوری در حالت دو خطی، الگوریتمی برای موازنه‌ی جرم چند خطی آورده شده است.

اهداف کلی مقاله به دو بخش تقسیم می‌شود:

- ✓ ارائه روشی نوین بر اساس ماتریس سیکل‌های پایه برای طبقه‌بندی متغیرها بر حسب میزان دسترسی به مقدار آنها و استخراج بخش قابل مشاهده و تعدیل داده‌ها
- ✓ ارائه روش‌های موازنه‌ی جرم و اصلاح داده‌ها برای سیستم‌های دو و چند متغیره

## ۲- طبقه‌بندی متغیرها بر حسب میزان دسترسی

### ۲-۱- ماتریس سیکل‌های پایه

برای انجام محاسبات متالورژیکی و کنترل یک واحد فرآوری لازم است در ابتدا مشخص شود که کدام بخش از مدار قابل مشاهده است و آیا میزان اطلاعات در دسترس به حدی است که بتوان کل مدار را مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داد یا به دلیل کمبود اطلاعات از مدار و عدم اندازه‌گیری‌های مناسب امکان بررسی مدار وجود ندارد و یا نهایتاً بخشی از آن را می‌توان مورد مطالعه قرار داد. به این منظور از روشی مبتنی بر تئوری شبکه‌ها و سیکل‌های مدار و تعیین ماتریس سیکل‌های پایه استفاده می‌شود. معادله (۱) فرم کلی ماتریس سیکل‌های پایه را نشان می‌دهد:

$$C_f = [C_{ij}]_{(v-n, v)} \quad (1)$$

که در آن

$C_f$ : ماتریس سیکل پایه

$v$ : تعداد جریان‌های مدار

$n$ : تعداد واحدهای فرآیندی (گره‌های) مدار

$C_{ij}$ : المان‌های ماتریس سیکل پایه که حاوی مقادیر صفر، ۱

و -۱ بوده و به شرح زیر هستند:

- اگر جریان  $i$  ارتباطی با سیکل  $j$  نداشته باشد،  $C_{ij}$  برابر صفر است.

Ragot و همکاران (۱۹۹۶) هنگامی که نرخ‌های جریان، تنها متغیر مدل هستند، ارائه شده است [۳ و ۴]. متأسفانه به دلیل وجود محدودیت‌ها در محاسبات، تاکنون روش جامع و کلی برای طبقه‌بندی متغیرها در حالت دو متغیره (دبی و عیار) و استخراج بخش قابل مشاهده ارائه نشده است.

محاسبات موازنه جرم در مدارهای فرآوری یک گام اساسی در ارزیابی و کنترل عملیات است. این محاسبات که بر پایه قانون بقای جرم استوارند، عمدتاً بر اساس محاسبه نرخ‌های جریان مواد در مدار صورت می‌گیرند. به همین منظور اطلاعاتی نظیر عیار فلز، درصد جامد و توزیع دانه‌بندی، جمع‌آوری و سپس با استفاده از این داده‌ها، محاسبه موازنه انجام می‌شود. موازنه جرم در یک مدار ساده به سهولت امکان پذیر است، اما در مدارهای پیچیده، با استفاده از نرم افزار و مبتنی بر روش‌های حل ماتریسی امکان پذیر است. بدین منظور در گام نخست لازم است تعداد حداقلی از جریان‌ها برای اندازه‌گیری یا نمونه‌گیری مشخص شوند (محل اندازه‌گیری) و سپس با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده محاسبات موازنه و در صورت لزوم تخمین مقدار متغیرهای اندازه‌گیری نشده و یا تعدیل برخی مقادیر اندازه‌گیری شده انجام شود.

هودوان و همکاران (۱۹۸۰، ۱۹۸۸ و ۱۹۹۸) و اسباربارو و همکاران (۲۰۱۱) امکان سنجی محاسبات موازنه جرم را برای مدار پیچیده فرآوری شامل اندازه‌گیری نرخ‌های جریان، درصد جامد، توزیع اندازه ذرات، عیار فلز در هر طبقه ابعادی بررسی کرده‌اند. در این مطالعه روشی بر اساس حداقل مربعات برای تعیین متغیرهای اندازه‌گیری نشده و قابل محاسبه و متغیرهای اندازه‌گیری شده و قابل اصلاح ارائه شده است [۵، ۶، ۷ و ۸]. ماندل و همکاران در سال ۱۹۹۸ روش جدیدی را بر اساس حداقل کردن توزیع خطای اندازه‌گیری بر اساس نامعادلات ارائه داده‌اند [۸]. در این روش نیاز به فرضیه‌های کمتری بوده و بر اساس مدل‌های نیمه تجربی است. عموماً حجم محاسبات موازنه‌ی جرم زیاد و حل این گونه مسائل وقت‌گیر است. بنیسی و همکاران در سال ۱۹۹۷ نرم افزار موازن را برای موازنه‌ی جرم مدار فرآوری مجتمع مس سرچشمه ارائه کرده‌اند. موازن یک

$$(C_t)_{m,k} = \begin{cases} 0 & \text{if } (C_f)_{i,k} = (C_f)_{j,k} \\ 1 & \text{if } (C_f)_{i,k} \neq (C_f)_{j,k} \end{cases} \quad (6)$$

تعداد کل سیکل‌ها از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$N_{\text{cycle}} = 2^{v-n} - 1 \quad (7)$$

## ۲-۲- الگوریتم دسته بندی متغیرها در حالت دو متغیره (دبی و عیار)

با استفاده از الگوریتم زیر می‌توان متغیرهای دبی و عیار مدار مورد مطالعه را با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده و در دسترس در یکی از دسته‌بندی‌های ذکر شده در بالا قرار داد:

- متغیر  $q_j$  (دبی جریان  $j$  ام) اندازه‌گیری شده و قابل اصلاح است اگر در کلیه سیکل‌هایی که وارد می‌شود علاوه بر خودش حداقل یکی از  $q$  ها اندازه‌گیری شده باشد.
- متغیر  $q_j$  اندازه‌گیری شده و غیر قابل اصلاح است اگر فقط در یک سیکل، تنها خودش اندازه‌گیری شده باشد.
- متغیر  $q_j$  اندازه‌گیری نشده و غیر قابل محاسبه است اگر حداقل به یک سیکل تعلق داشته باشد که همه  $q$  ها اندازه‌گیری نشده باشند و از  $c$  ها (عیار جریان) نیز فقط یکی اندازه‌گیری شده باشد.
- متغیر  $C_j$  (عیار فلز در جریان  $j$  ام) اندازه‌گیری شده و قابل اصلاح است اگر در کلیه سیکل‌هایی که وارد می‌شود حداقل یک دبی و حداقل دو عیار اندازه‌گیری شده باشند.
- متغیر  $C_j$  اندازه‌گیری نشده و قابل محاسبه است اگر در کلیه سیکل‌هایی که وارد می‌شود حداقل یک دبی و حداقل یک عیار اندازه‌گیری شده باشند.
- متغیر  $C_j$  اندازه‌گیری نشده و غیر قابل محاسبه است اگر حداقل به یک سیکل تعلق داشته باشد که همه دبی‌ها اندازه‌گیری نشده باشند و حداقل یک عیار اندازه‌گیری شده باشد.
- متغیر  $C_j$  اندازه‌گیری نشده و غیر قابل محاسبه است اگر حداقل به یک سیکل تعلق داشته باشد که همه عیارها اندازه‌گیری نشده باشند.

▪ اگر جریان  $z$  در سیکل پایه  $i$  و هم جهت با آن باشد،  $C_{ij}$  برابر ۱ است.

▪ اگر جریان  $z$  در سیکل پایه  $i$  و خلاف جهت با آن باشد،  $C_{ij}$  برابر -۱ است.

فرم کانیونیک (Canonic) ماتریس سیکل‌های پایه به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود:

$$C_f = \left[ C_{fc} \mid I_f \right]_{(v-n, n)} \quad (2)$$

که در رابطه (۲) متغیرها به صورت زیر هستند:

$$I_f = \text{ماتریس واحد با بعد } (v-n)$$

$C_{fc}$  = ماتریس با بعد  $((v-n).n)$  که توسط تبدیلات ماتریسی روی ماتریس ارتباط و با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$C_{fc} = (-M_{cs})^T \quad (3)$$

ماتریس  $M_{cs}$ ، فرم کانیونیک ماتریس ارتباط  $(M_c)$  است که در رابطه (۴) نشان داده شده است. فرم کانیونیک ماتریس با بکار بردن روش گوس - جردن و پیوتینگ (Pivoting) ساخته می‌شود.

$$M_c = \left[ I_c \mid M_{cs} \right] \quad (4)$$

در رابطه (۴) متغیرها عبارتند از:

$$I_c = \text{ماتریس واحد با بعد } (n, n)$$

$M_{cs}$  = ماتریس با بعد  $(n, (v-n))$  شامل المان‌های باقیمانده از پیوتینگ

با جایگزینی رابطه (۳) در رابطه (۲)، رابطه سیکل‌های پایه (۵) به دست می‌آید:

$$C_f = \left[ (-M_{cs})^T \mid I_f \right]_{(v-n, n)} \quad (5)$$

ماتریس تمام سیکل‌های مدار (که حاوی کل سیکل‌های جریان در داخل مدار است) با استفاده از ترکیب‌های منطقی دوتایی، سه تایی و ... ردیف‌های ماتریس سیکل‌های پایه، نوشته می‌شود که در رابطه (۶) نشان داده شده است. برای محاسبه ماتریس تمام سیکل‌های مدار، قدر مطلق اعضای ماتریس سیکل پایه در نظر گرفته می‌شود.

### ۲-۳- استخراج بخش قابل مشاهده در حالت دو متغیره

در یک سیستم دارای دبی و عیار اندازه‌گیری شده دو قاعده برای استخراج زیر شبکه وجود دارد که به صورت زیر است:

قاعده ۱:

- حذف گره‌های دارای جریان خارجی با عیار اندازه‌گیری نشده
- ادغام گره‌های دارای جریان‌های مشترک با عیار اندازه‌گیری نشده
- پس از اعمال موارد فوق معادلات موازنه‌ی دو خطی بین دبی و عیار در مدار باقی مانده نوشته می‌شود.

قاعده ۲:

با توجه به اندازه‌گیری‌های عیار:

- حذف گره‌های دارای جریان خارجی با دبی اندازه‌گیری نشده
- ادغام گره‌های دارای جریان مشترک با دبی اندازه‌گیری نشده
- حذف کلیه گره‌های دارای جریان‌های با عیار اندازه‌گیری شده
- پس از اعمال موارد فوق معادلات موازنه‌ی دو خطی بین دبی و عیار در مدار باقی مانده نوشته می‌شود.
- پس از اعمال قواعد مذکور بر روی مدار، شکل جدیدی از مدار حاصل می‌شود، که شکل ماتریس معادلات خطی (تک متغیره) آن به صورت رابطه (۸) می‌باشد:

$$A\hat{Q} = 0 \quad (8)$$

که در آن متغیرها به صورت زیر هستند:

A: ماتریس تغییر یافته ارتباط مدار با توجه به بخش قابل مشاهده مدار با بعد  $(n_a, v_a)$

$n_a$ : تعداد معادلات خطی

$v_a$ : تعداد دبی‌های وارد شده در معادلات خطی

فرم ماتریسی معادلات دو متغیره به صورت رابطه (۹) می‌باشد:

$$B(S\hat{Q}) * \hat{C} = 0 \quad (9)$$

B: ماتریس ارتباط با بعد  $(n_b, v_b)$

S: ماتریس انتخاب دبی‌هایی که در معادلات موازنه دو

خطی وارد می‌شوند با بعد  $(v_b, v_a)$

$n_b$ : تعداد معادلات دو متغیره

$v_b$ : تعداد دبی‌های وارد شده در معادلات دو متغیره

$\hat{Q}$  و  $\hat{C}$ : به ترتیب بردارهای با بعد  $v_b$  و  $v_a$

\* نشان دهنده ضرب مستقیم است.

در روابط (۸) و (۹) فرم عمومی ماتریس A و B به

صورت زیر است:

$$A = \begin{bmatrix} M_1 = B & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{matrix} \uparrow n_b \\ \uparrow n_a \end{matrix}$$

The diagram shows a block matrix A with two rows and two columns. The top-left block is labeled M1 = B, the top-right is 0, the bottom-left is 0, and the bottom-right is M2. Above the matrix, a horizontal arrow labeled v\_a spans the width, and a vertical arrow labeled n\_b is on the right. Below the matrix, a vertical arrow labeled n\_a is on the right. Underneath the matrix, there are labels for nodes and currents: 'دبی جریان' (Current flow) above the top row, and 'عیار' (Concentration) above the bottom row. Below these, there are labels for nodes: 'اندازه‌گیری نشده' (Not measured) and 'اندازه‌گیری شده' (Measured) for both current and concentration.

فرم ماتریس S با توجه به بردار جریان‌ها به قرار زیر

است:

$$S = [I_{v_b} \ 0]$$

با توجه به روابط بیان شده، تخمین مقادیر دبی و عیار با

کمینه کردن عبارت زیر و تحت مدل موازنه‌ی جرم و

موازنه‌ی فلز، به صورت زیر است:

$$\phi = \frac{1}{2} \|Z - H\hat{Q}\|_{V_q^{-1}}^2 + \frac{1}{2} \|C - \hat{C}\|_{V_c^{-1}}^2 \quad (10)$$

$$A\hat{Q} = 0$$

$$B(S\hat{Q}) * \hat{C} = 0$$

$\hat{C}$  و C: بردار مسیرهایی که عیار آنها اندازه‌گیری شده با

بعد  $(v_b)$

Z: بردار دبی‌های اندازه‌گیری شده با بعد (z)

$\hat{Q}$ : بردار دبی‌های تخمین زده شده با بعد  $(v_b)$

$V_q$  و  $V_c$ : ماتریس‌های واریانس اندازه‌گیری دبی و عیار

به ترتیب با بعد  $(Z, Z)$  و  $(v_b, v_b)$

H: ماتریس انتخاب دبی‌های اندازه‌گیری شده از بردار

دبی‌های قابل مشاهده  $(Z, v_b)$

$$H = [0 \ I_z]$$

حل مسئله بهینه سازی فوق با استفاده از لاگرانژین  $(\mu)$

و  $(\lambda)$  طبق رابطه (۱۱) و تعیین نقاط بهینه به وسیله‌ی یک

الگوریتم سلسله مراتبی (Hierarchical) و تکرار است:

$$L = \phi + \lambda^T A\hat{Q} + \mu^T B(S\hat{Q}) * \hat{C} \quad (11)$$

جواب مسئله لاگرانژین فوق پاسخ تحلیلی ندارد و به

صورت سلسله مراتبی و از طریق تکرار حل می‌شود. الگوریتم

زیر این فرآیند سلسله مراتبی را نشان می‌دهد:

(الف) فرض مقادیری برای  $\mu$  و  $\hat{C}$  و محاسبه ماتریس  $G$

$$G = H^T V_q^{-1} H + A^T A + S^T N_C^T N_C S \quad (12)$$

(ب) محاسبه  $\hat{Q}$  پس از تعیین  $G$

$$(13)$$

$$\hat{Q} = (G^{-1} - G^{-1} A^T (A G^{-1} A^T)^{-1} A G^{-1}) (H^T V_q^{-1} Z - S^T N_C^T \mu)$$

$$N_Q = BSL_Q \quad (14)$$

$L_Q$ : ماتریس قطری حاصل از قطری کردن بردار دبی‌ها

(ج) سپس با مقادیر بدست آمده  $\hat{Q}$ ، عیارها و بردار لاگرانژین  $\mu$  از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\hat{C} = C - V_C N_Q^T (N_Q V_C N_Q^T)^{-1} N_Q C \quad (15)$$

$$\mu = (N_Q V_C N_Q^T)^{-1} N_Q C \quad (16)$$

در روابط فوق  $N_C$  برابر است با:

$$N_C = BL_C \quad (17)$$

$L_C$ : ماتریس قطری حاصل از قطری کردن بردار عیارها

با مقادیر به دست آمده مجدداً سیکل تکرار می‌شود.

الگوریتم فوق زمانی خاتمه می‌یابد که اختلاف دو مقدار تخمین زده شده متوالی از حد تعریف شده‌ای کمتر شود.

### ۳- تصحیح خطا و موازنه جرم مدار

به دلیل خطای نمونه‌برداری، آماده‌سازی و تجزیه شیمیایی نمونه‌های گرفته شده از مدارهای فرآوری و به منظور تصحیح داده‌های حاصله از یک سو و مشکل نمونه‌گیری در مدارهای پیچیده و عدم دستیابی به نمونه مناسب از جریانی خاص از سوی دیگر، باید به روش موازنه‌ی جرمی مواد، اولاً داده‌های به دست آمده را تصحیح و ثانیاً مشخصات جریان‌های مجهول در مدارهای پیچیده را نیز محاسبه کرد. در موازنه جرم همیشه فرض می‌شود که در طول فرآیند نمونه‌گیری، مدار همواره حالت پایا داشته و اعم خطاها نیز از همین فرض ناشی می‌شود. در واقع به دلیل اختلال در جریان و نوع ترکیبات هر مدار، نمونه‌های برداشته شده به طور کامل گویای واقعی جریان نیستند؛ بنابراین با به‌کارگیری موازنه‌ی جرم، خطاها کاهش می‌یابد و در نتیجه خطاهای مرحله نمونه‌برداری، آماده‌سازی و عیارسنجی نیز

به حداقل ممکن خواهد رسید. در واقع اطلاعات و یا داده‌های تصحیح شده به طور متوسط به مقادیر واقعی خیلی نزدیک‌تر هستند تا داده‌های اندازه‌گیری شده؛ بنابراین تعدیل داده‌ها از پارامترهای اساسی محسوب می‌شود.

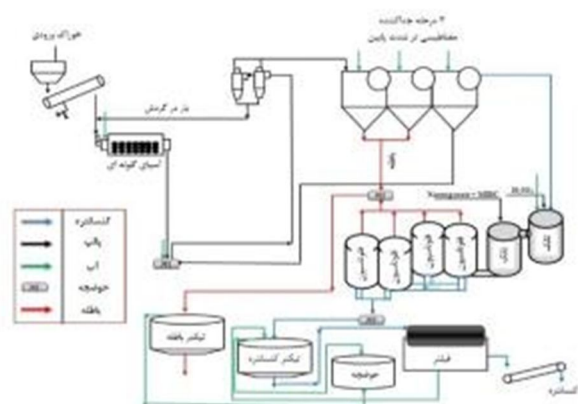
بر خلاف سادگی مفهوم قانون بقای جرم، موازنه‌ی جرم در کارخانه‌های فرآوری اغلب کاری مشکل و وقت‌گیر است. معادلاتی که برای تصحیح داده‌ها و تعیین نرخ‌های جریان نوشته می‌شوند به طور تحلیلی قابل حل نیستند و باید با روش‌های سعی و خطا حل شوند. با پیچیده شدن مدارهای فرآوری، تعداد متغیرهایی که باید با روش سعی و خطا محاسبه شوند زیاد شده و در نتیجه حجم محاسبات به طور تصاعدی افزایش پیدا می‌کند. در این مبحث فرض می‌شود که دستگاه‌ها و واحدهای عملیاتی کارخانه فرآوری، عمل‌کننده‌های صرفاً فیزیکی هستند. به عبارت بهتر، فرض می‌شود که طی مراحل مختلف پر عیار سازی، ماده معدنی دچار هیچ تغییر شیمیایی نمی‌شود. فرض ثابت ماندن ترکیب شیمیایی مواد در کارخانه‌های فرآوری، تا حد قابل قبولی معتبر است. همچنین فرض می‌شود در مدت زمان نمونه برداری، کارخانه در حالت پایا قرار دارد.

تخمین کیفیت فرآیند به بررسی عملکرد، مدل‌سازی فرآیندی، پایش، سرپرستی، کنترل و بهینه‌سازی زمان واقعی نیاز دارد. جمع‌آوری اطلاعات تجربی اولین قدم در تخمین کیفیت فرآیند در هرکدام از مقیاس‌های فرآیند (آزمایشگاه، نیمه‌صنعتی و یا صنعتی) است. متأسفانه در رشته مهندسی متالورژی به ویژه در مقیاس صنعتی آن، اندازه‌گیری‌های صورت گرفته دارای خطا و ناقص هستند و استفاده از داده‌های ناقص منجر به تعریف مدل‌های ناکارآمد، تصمیم‌گیری‌های نادرست و سیستم‌های طراحی و عملیاتی نامناسب خواهد شد؛ بنابراین اصلاح آن‌ها قبل از به‌کارگیری در کاربردهای اشاره شده ضروری است. لازم به ذکر است داده‌های استفاده شده در این مقاله از اطلاعات صنعتی به دست آمده و معرف شرایط واقعی کارخانه هستند.

موازنه‌ی جرم به همراه تصحیح داده‌ها در حالت دو خطی

به صورت زیر به دست می‌آید [۹]:

$$N \hat{C}_i = 0 \quad (18)$$

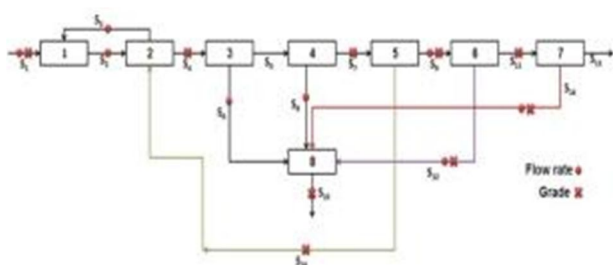


شکل ۲: مدار فرآوری خط سولفورزدایی از کنسانتره شرکت سنگ آهن گل‌گهر

#### ۵- ماتریس سیکل‌های پایه مدار SRP

۵-۱- دسته بندی جریان‌های مدار (قابل محاسبه، قابل اصلاح) بر اساس ماتریس سیکل‌های پایه (عیار و دبی)

از آنجایی که در واحدهای فرآوری، عیار و بازیابی در تمام جریان‌ها اندازه‌گیری نمی‌شود برای همین یافتن جریان‌های قابل محاسبه، قابل اصلاح و ... با توجه به مطالب مذکور در بخش مقدمه (چهار زیرگروه دسته بندی شده)، امری ضروری است. برای سنجش روش پیشنهادی بر اساس سیکل‌های پایه، نمودار گره و جریان مدار فرآوری واحد SRP و مکان‌های اندازه‌گیری نرخ‌های جریان و عیار به صورت شکل (۳) و جداول ۱ و ۲ در نظر گرفته شد.



شکل ۳: نقاط نمونه‌برداری از جریان‌های مدار SRP

در ابتدا با توجه به متغیرهای اندازه‌گیری، ماتریس ارتباط به قرار زیر تشکیل می‌شود:

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$N = MLQ \quad (19)$$

$$\hat{Q} = Q - V_Q M^T (M V_Q M^T)^{-1} M Q \quad (20)$$

$$\hat{C}_i = C_i - V_{C_i} N^T (N V_{C_i} N^T)^{-1} N Q \quad (21)$$

فرم عمومی معادله در حالت چند متغیره با بردار متغیرهای X به صورت زیر است [۹]:

$$\hat{X}_{i+1} = (I - V_{i+1} M_{1...i}^T V_{i+1} M_{1...i}^T)^{-1} M_{1...i} \quad (22)$$

$$(X_{i+1} - V_{i+1} L_{i+2} L_{i+1}^{-1} V_{i+2}^{-1} (\hat{X}_{i+2} - X_{i+2})) \quad (23)$$

$$M_{ijk} = M \cdot \hat{X}_i \cdot \hat{X}_j \cdot \hat{X}_k \quad (24)$$

$$M_{ijk} = M L_i L_j L_k \quad (25)$$

#### ۴- مدار فرآوری واحد سولفورزدایی (SRP) سنگ آهن گل‌گهر

کنسانتره کارخانه فرآوری مگنتیت سنگ آهن گل‌گهر برای سولفورزدایی ابتدا به مخزن ۲۰۰۰ تنی ارسال و سپس توسط نوار نقاله به آسیای گلوله‌ای وارد می‌شود. سرریز سیکلون‌ها (کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون) که در مدار بسته با آسیای گلوله‌ای کار می‌کنند، توسط پمپ به سه دستگاه جداکننده مغناطیسی شدت پایین منتقل شده و ته ریز آن به آسیای گلوله‌ای برگردانده می‌شود. جدایش ذرات سنگ آهن از سایر مواد توسط جداکننده مغناطیسی طی سه مرحله صورت می‌گیرد. باطله‌ی جداکننده‌های مرحله اول و دوم (باطله نهایی) به تیکنر باطله ارسال می‌گردد. کنسانتره مرحله سوم، کنسانتره نهایی کارخانه را تشکیل داده و باطله این مرحله به خوراک جداکننده مغناطیسی مرحله دوم اضافه می‌گردد. کنسانتره نهایی جداکننده مغناطیسی به منظور سولفورزدایی به مرحله فلوتاسیون انتقال می‌یابد. در انتها کنسانتره نهایی فرآیند با عیار گوگرد مناسب برای کارخانه گندله‌سازی وارد تیکنر کنسانتره برای آب‌گیری می‌شود. در عملیات فلوتاسیون، از اسید سولفوریک برای تنظیم pH استفاده می‌گردد. شکل ۲ مدار فرآوری مورد مطالعه در این مقاله را نشان می‌دهد.

ضمیمه نشان داده شده‌اند (به دلیل بزرگ بودن ماتریس، بخشی از آن آمده است).

با استفاده از ماتریس تمام سیکل‌ها و با توجه به روش تعیین اندازه‌گیری‌ها در حالت دو متغیره (بخش ۲-۲)، دسته‌بندی جریان‌های مدار SRP با توجه به وضعیت داده‌های مدار موجود (شکل ۳) در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات جریان‌های مدار SRP

جریان	اندازه‌گیری شده	قابل اصلاح	غیر قابل محاسبه	قابل محاسبه
۱	دبی-عیار	دبی - عیار	-	-
۲	دبی	دبی	عیار	-
۳	دبی	دبی	عیار	-
۴	عیار	-	-	دبی
۵	-	-	عیار	دبی
۶	دبی	دبی	عیار	-
۷	عیار	دبی	-	-
۸	دبی	دبی	عیار	-
۹	دبی-عیار	دبی-عیار	-	-
۱۰	عیار	-	-	دبی
۱۱	عیار	دبی - عیار	-	-
۱۲	دبی - عیار	دبی - عیار	-	-
۱۳	-	دبی-عیار	-	-
۱۴	دبی - عیار	دبی-عیار	-	-
۱۵	عیار	دبی-عیار	-	-

سیکلی که نشان می‌دهد دبی جریان‌های ۵، ۱۰ و ۴ قابل اصلاح شدن نیستند عبارتست از:

1	2	4	5	6	7	9	11	3	8	10	12	13	14	15
0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

سیکل‌هایی که نشان می‌دهد عیار جریان‌های ۵، ۶، ۳، ۸ و ۲ قابل محاسبه نیستند عبارتست از:

1	2	4	5	6	7	9	11	3	8	10	12	13	14	15
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

سیکل‌هایی که نشان می‌دهد عیار جریان‌های ۴، ۷ و ۱۰ قابل اصلاح نیستند عبارتست از:

1	2	4	5	6	7	9	11	3	8	10	12	13	14	15
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

جدول ۱: مشخصات گره‌های مدار SRP

گره	تجهیز
۱	آسیای گلوله‌ای
۲	هیدروسیکلون
۳	جداکننده مغناطیسی شدت پایین ۱
۴	جداکننده مغناطیسی شدت پایین ۲
۵	جداکننده مغناطیسی شدت پایین ۳
۶	سلول فلوتاسیون ۱
۷	سلول فلوتاسیون ۲
۸	حوضچه باطله

برای تبدیل کردن ماتریس ارتباط به فرم کانیونیک، از روش گوس-جردن استفاده می‌شود که در دو مرحله به دست می‌آید.

$$M_c(1) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$M_c(2) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 5 & 6 & 7 & 9 & 11 & 3 & 8 & 10 & 12 & 13 & 14 & 15 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود فرم کانیونیک ماتریس ارتباط به نحوی محاسبه می‌شود که ماتریس واحد  $8 \times 8$  در قسمت سمت چپ ماتریس تشکیل شود و مابقی ماتریس برابر ماتریس  $M_{cs}$  است. در نتیجه ماتریس  $C_{fc}$  طبق رابطه (۳) به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$C_{fc} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

تعداد کل سیکل‌ها از رابطه ۷ برابر است با:

$$N_{cycle} = 2^7 - 1 = 127$$

با توجه به رابطه (۵) و ماتریس  $C_{fc}$ ، ماتریس  $C_f$  یا همان ماتریس سیکل‌های پایه به دست می‌آید که در بخش



با توجه به روابط ذکر شده در بخش ۲-۴، باید ماتریس‌های مورد نیاز برای استخراج بخش قابل مشاهده در حالت دو خطی شامل H و S محاسبه شوند. ماتریس‌های  $V_Q$  و  $V_C$ ، ماتریس‌های قطری واریانس اندازه‌گیری دبی و عیار هستند (واریانس ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است).

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$V_Q = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 12 & 14 & 2 & 3 & 6 & 8 \\ 0.89 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.72 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.47 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.03 \end{pmatrix}$$

$$V_C = \begin{pmatrix} 4 & 7 & 10 & 11 & 15 & 1 & 9 & 12 & 14 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.68 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.66 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.68 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.64 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.67 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.68 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.65 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.65 \end{pmatrix}$$

مقادیر  $N_C$  و  $N_Q$  از رابطه ۱۴ و ۱۷ محاسبه می‌شود. سپس  $Q_{es}$  و  $C_{es}$  از روابط ۱۲ و ۱۵ به دست می‌آیند. لازم به ذکر است، پس از محاسبه مقادیر در مرحله اول، در گام بعدی با توجه به نتایج مرحله قبل، قواعد بخش ۲-۳ با شرایط جدید تکرار می‌گردد. نهایتاً مقادیر بخش قابل مشاهده پس از ۱۰ مرتبه تکرار (میزان همگرایی ۰/۰۰۱) به دست می‌آید که در جدول ۳ آورده شده است.

۵-۲- استخراج بخش قابل مشاهده از طریق ماتریس سیستم با استفاده از عیار و دبی

برای استخراج بخش قابل مشاهده طبق دو قاعده ذکر شده عمل می‌شود:

الف) با توجه به قاعده ۱ (بخش ۲-۳)، معادلات زیر را می‌توان نوشت:

حذف گره ۷  
ادغام گره‌های ۳ و ۴  
ادغام گره‌های ۱ و ۲

$$Q_1 - Q_4 + Q_{10} = 0$$

$$Q_4 - Q_7 - Q_{15} + Q_{14} = 0$$

$$Q_7 - Q_{10} - Q_9 = 0$$

$$Q_9 - Q_{12} - Q_{11} = 0$$

$$Q_1 C_1 - Q_4 C_4 + Q_{10} C_{10} = 0$$

$$Q_4 C_4 - Q_7 C_7 - Q_{15} C_{15} + Q_{14} C_{14} = 0$$

$$Q_7 C_7 - Q_{10} C_{10} - Q_9 C_9 = 0$$

$$Q_9 C_9 - Q_{12} C_{12} - Q_{11} C_{11} = 0$$

ب) با توجه به قاعده ۲:

حذف گره‌های ۶ و ۷

ادغام گره‌های ۲ و ۳ و ۴ و ۵

$$Q_1 - Q_2 + Q_3 = 0$$

$$Q_2 - Q_3 - Q_6 - Q_8 - Q_9 = 0$$

$$Q_{14} + Q_{12} + Q_8 + Q_6 - Q_{15} = 0$$

از معادلات بالا، ماتریس A بر اساس آنچه در بخش ۲-۳

بیان شد به دست می‌آید. سپس با توجه به شکل عمومی ماتریس A، ماتریس B محاسبه می‌شود.

$$A = \begin{pmatrix} 4 & 7 & 10 & 11 & 15 & 1 & 9 & 12 & 14 & 2 & 3 & 6 & 8 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 4 & 7 & 10 & 11 & 15 & 1 & 9 & 12 & 14 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

### ۶- محاسبات موازنه‌ی جرم مدار

در بخش‌های قبل به استخراج بخش قابل مشاهده در مداری که بعضی از مشخصات جریان‌های آن‌ها اندازه‌گیری نشده پرداخته شد ولی در این قسمت موازنه‌ی جرم و اصلاح داده‌ها در مدارهایی که تمام مشخصات جریان‌های آنها اندازه‌گیری شده است تشریح می‌گردد.

جدول ۳: استخراج بخش قابل مشاهده مدار SRP

جریان	داده‌های در دسترس		استخراج بخش قابل مشاهده	
	دبی (t/h)	عیار (%)	دبی (t/h)	عیار (%)
۱	۸۹	۶۶/۷	۸۲/۵	۶۷/۴۴
۲	۱۴۷	-	۱۴۲/۵	-
۳	۶۰	-	۶۱	-
۴	-	۶۶	۸۵	۶۶
۵	-	-	۷۸/۵	-
۶	۶	-	۶/۶	-
۷	-	۶۸/۱۸	۷۵/۵	۶۷/۹
۸	۳	-	۳	-
۹	۷۲	۶۸/۲۸	۷۳	۶۸
۱۰	-	۶۶	۲/۵	۶۵
۱۱	-	۶۸/۴۵	۷۱	۶۸/۰۸
۱۲	۲	۶۵/۱	۲/۰۰	۶۵/۱
۱۳	-	-	۶۹/۹	۶۸/۱۴
۱۴	۱	۶۵/۲	۱/۰۰	۶۵/۲
۱۵	-	۶۴/۱	۱۲/۶	۶۳/۶

مشخص، برقرار می‌گردد. انحراف معیار برای کلیه مقادیر اندازه‌گیری شده برای همه جریان‌ها به طور پیش فرض ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. واریانس پارامتری است که میزان دقت و کیفیت هر یک از عیارها و دبی‌ها را معرفی می‌کند. در این مقاله از نرم افزار متلب برای موازنه‌ی جرم مدار مذکور استفاده شده است.

با استفاده از قواعد تعیین اندازه‌گیری‌ها در حالت دو متغیره، نتایج موازنه‌ی جریان‌های مدار SRP در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴: مشخصات جریان‌های مدار SRP در حالت دو متغیره

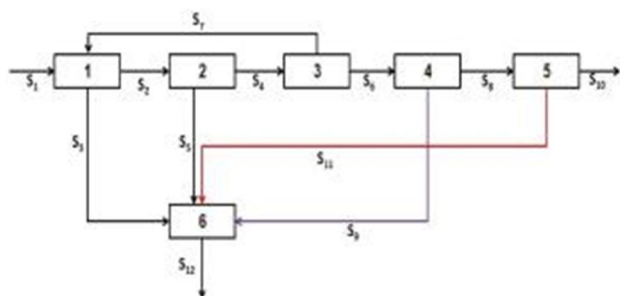
جریان	موازنه نشده		موازنه شده	
	دبی (t/h)	عیار (%)	دبی (t/h)	عیار (%)
۱	۸۹	۶۶/۷	۸۲/۰۷	۶۷/۴۷
۲	۱۴۷	۶۶/۵	۱۴۲/۷۷	۶۵/۸۳
۳	۶۰	۶۳/۳۹	۶۰/۷۰	۶۳/۶۳
۴	۸۹	۶۶	۸۴/۰۷	۶۷/۴۳
۵	۷۶	۶۸	۷۷/۸۷	۶۷/۸۲
۶	۶	۶۲/۴	۶/۲۰	۶۲/۴۷
۷	۷۵	۶۸/۱۸	۷۴/۸۲	۶۷/۹۵
۸	۳	۶۴/۶	۳/۰۵	۶۴/۶۴
۹	۷۲	۶۸/۲۸	۷۲/۸۲	۶۸/۰۱
۱۰	۲	۶۶	۲/۰۰	۶۵/۹۸
۱۱	۶۹	۶۸/۴۵	۷۰/۸۰	۶۸/۰۹
۱۲	۲	۶۵/۱	۲/۰۰	۶۵/۱۴
۱۳	۶۸	۶۸/۵۵	۶۹/۸۰	۶۸/۱۳
۱۴	۱	۶۵/۲	۱/۰۰	۶۵/۲۲
۱۵	۱۳	۶۴/۱	۱۲/۲۷	۶۳/۶۷

### ۶-۲- تصحیح مشخصات مدار به روش چند خطی

برای موازنه‌ی جرم مدار در حالت چند متغیره از بخش‌های مختلف مدار نمونه‌برداری و دانسیته پالپ، درصد ذرات زیر ۶۳ میکرون در هر جریان و عیار آهن مربوط به این محدوده دانه بندی اندازه‌گیری شد. نتایج آنالیز نمونه‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. در این قسمت، بخش خردایش و طبقه‌بندی (آسیای گلوله‌ای و سیکلون) حذف گردید و مدار مورد مطالعه به صورت شکل ۴ در آمده است.

### ۶-۱- تصحیح دبی و عیارها به روش دو خطی

در این مسئله فرض بر این است که کلیه عیارها و دبی‌ها در تمام جریان‌ها اندازه‌گیری شده‌اند (مدار شکل ۳ با اندازه‌گیری همه جریان‌ها). نمونه‌گیری‌ها برای هر جریان در طول یک شیفت کاری جمع آوری شده است. به طوری که فواصل زمانی هر نمونه‌گیری ۱ ساعت بوده و نمونه‌های گرفته شده از هر جریان (۸ نمونه با فواصل زمانی ۱ ساعت) با یکدیگر مخلوط و نمونه معرف تهیه شده است (جدول ۴). در ابتدا برای تصحیح دبی و عیارها، ماتریس ارتباط تشکیل می‌شود (ماتریس ارتباط بخش ۵-۱). سپس با استفاده از روابط تعیین شده موازنه‌ی جرم دبی و عیارها با واریانس



شکل ۴: نمودار گره‌ای مدار مورد مطالعه با حذف سیستم خردایش

### ۷- نتیجه‌گیری

انجام موازنه‌ی جرم در مدارهای مختلف جدایش، که پیش‌نیاز کنترل و بهینه‌سازی عملیات است، به دلیل مشکلات نمونه‌برداری و هزینه‌های مربوطه، از حساسیت خاصی برخوردار است. در روابط ارائه شده در مبحث نمونه‌برداری، معمولاً تعداد حداقل نمونه مشخص می‌شود و نحوه انتخاب جریان‌ها در هاله‌ای از ابهام قرار دارد. همچنین به دلیل حضور خطاهای اتفاقی در نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌های گرفته شده از مدارهای پرعیارکنی لازم است که با استفاده از روابط موازنه‌ی جرم، مقادیر بدست آمده اصلاح شود. در موارد زیادی امکان نمونه‌برداری از بعضی قسمت‌های مدار مقدور نیست؛ برای همین محاسبه جریان‌های مجهول از طریق موازنه جرم ضروری است. برای محاسبه جریان‌های مجهول یا تصحیح جریان‌های اندازه‌گیری شده در مدارهای پیچیده، نیاز به تعیین مشخصات تمام جریان‌ها (از نظر قابل محاسبه یا قابل اصلاح بودن) است.

در این مقاله یک آزمون گام به گام مربوط به کارخانه فرآوری سولفورزدایی مجتمع سنگ آهن گل‌گهر برای دسته بندی متغیرهای جریان‌ها، استخراج بخش قابل مشاهده و اصلاح داده‌ها ارائه گردید. بدین منظور روشی بر اساس ماتریس سیکل‌های پایه برای تعیین مشخصات جریان‌های مدار از نظر قابلیت محاسبه و اصلاح ارائه شده است. پس از تعیین مشخصات جریان‌های مدار، بخش قابل مشاهده و قابل اصلاح مدار با استفاده از برنامه نوشته شده در نرم افزار متلب محاسبه گردید. در بخش دوم مقاله روشی به منظور

جدول ۵: مشخصات گره‌های مشخص شده مدار SRP در حالت

چند متغیره

جریان	دبی (t/h)	عیار ذرات با دانه بندی زیر میکرون (%)	درصد ذرات زیر میکرون	دانسیته (gr/cm <sup>3</sup> )
۱	۸۷	۶۸/۱	۶۵	۱/۴۸
۲	۷۶	۶۷/۴	۵۸	۱/۶
۳	۶	۶۲/۵	۸۱	۱/۰۲
۴	۷۵	۶۸/۷	۵۲/۸	۱/۸۴
۵	۳	۶۶/۲	۷۷	۱/۰۲
۶	۷۲	۶۸/۸۸	۵۲/۲۸	۱/۸۶
۷	۲	۶۸	۶۹	۱/۰۱
۸	۶۹	۶۹/۳	۵۱/۶۹	۱/۸۷
۹	۲	۶۷	۷۴	۱/۳۸
۱۰	۶۸	۶۹/۵۸	۵۱/۲	۱/۸۸
۱۱	۱	۶۶/۴	۷۰	۱/۴
۱۲	۱۳	۶۲/۶	۸۴	۱/۰۶

پس از ۶ مرتبه تکرار مقادیر موازنه شده مدار در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: موازنه‌ی جرم مدار SRP در حالت چند متغیره

جریان	دبی (t/h)	عیار ذرات با دانه بندی زیر میکرون (%)	درصد ذرات زیر میکرون	دانسیته (gr/cm <sup>3</sup> )
۱	۸۲/۱۳	۶۸/۵۵	۵۵/۸	۱/۶۷
۲	۷۷/۹۲	۶۸/۷۸	۵۴/۹۱	۱/۷۰
۳	۶/۳۱	۶۳/۵۳	۸۲/۲۵	۰/۹۹
۴	۷۴/۸۷	۶۸/۸۸	۵۴/۴۱	۱/۷۳
۵	۳/۰۵	۶۴/۲۱	۷۷/۶۸	۱
۶	۷۲/۸۶	۶۸/۹	۵۴/۱۳	۱/۷۵
۷	۲	۶۷/۹۹	۷۲/۰۲	۱/۰۱
۸	۷۰/۸۶	۶۸/۹۶	۵۳/۷۱	۱/۷۶
۹	۲/۰۲	۶۶/۰۰	۷۴/۴۴	۱/۳۷
۱۰	۶۹/۸۵	۶۸/۹۹	۵۳/۴۹	۱/۷۷
۱۱	۱	۶۶/۴۰	۷۳/۱۸	۱/۴
۱۲	۱۲/۲۸	۶۴/۴۹	۷۸/۶۰	۱/۰۹

[5] Hodouin, D., Everell, M. D.: 1980: "A hierarchical procedure for adjustment and material balancing of mineral processing data": *Int. J. Miner. Process.* 7, 91-116.

[6] Hodouin, D., Bazin, C., Makni, S.: 1993: "On-line reconciliation of mineral processing data": *Proceedings of the AIME/SME Symposium Emerging Computer Techniques for the Mineral Industry.* Reno, Nevada, 101-110.

[7] Hodouin, D., Flament, F., Bazin, C.: 1988: "Reliability of material balance calculations: a sensitivity approach". *Miner. Eng.* 2 (2), 157-170.

[8] Sbarbaro, D., Del Villar, R.: 2010: *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants*: Springer

[9] Mandel, D., Abdollahzadeh, A., Maquin, D., Ragot, J.: 1998: "Data reconciliation by inequality balance equilibration: a LMI approach": *Int. J. Miner. Process.* 53, 157-169.

[۱۰] صمد بنیسی، محمد رضا یاراحمدی؛ ۱۳۸۰؛ موازنه جرم در سیستم‌های فرآوری مواد معدنی؛ دانشگاه هرمزگان، ویرایش اول

موازنه‌ی جرم مدار در حالت چند متغیره ارائه شد. به کارگیری این آزمون به دلیل ساختار مناسب آن در نرم افزار متلب، حجم محاسبات لازم را به حداقل رساند.

### ۸- منابع

[1] Mah, R.SH., Stanley, G.M. and Downing, D.M.: 1976: "Reconciliation and rectification of process flow and inventory data": *Eng. Chem., Process Des. Dev.* 15, 175-183.

[2] Mah, R.SH., Kretsovalis, A.: 1988: "Observability and redundancy classification in generalized process networks": *Computer and Chemical Engineering* 16:689-703

[3] Maquin, D. Bloch, G. Ragot J.: 1991: "Data reconciliation for measurements": *European Journal of Diagnosis and Safety in Automation*, 1 (2), p. 145-181

[4] Ragot, J., Luong, M., Maquin, D.: 1996: "Observability of systems involving flow circulation": *International Journal of Mineral Processing* 47:125-140

### ضمیمه

ماتریس تمام سیکل‌ها

Num	Stream no.	1	2	4	5	6	7	9	11	3	8	10	12	13	14	15
	Cycle															
1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	3	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	4	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
5	5	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
6	6	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
7	7	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	1+2	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
9	1+3	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
10	1+4	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
46	1+4+5+7	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1
47	1+4+6+7	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
48	1+5+6+7	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
49	1+2+3+4+5	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0
50	1+2+3+4+6	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
51	1+2+3+4+7	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
123	1+2+3+4+6+7	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
124	1+2+3+5+6+7	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1
125	1+2+4+5+6+7	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
126	1+3+4+5+6+7	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1
127	1+2+3+4+5+6+7	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1