

اصلاح مقادیر اندازه‌گیری شده مدارهای فرآوری با روش تحلیل

سلسله مراتبی

پریسا قبادی^۱؛ علی اکبر عبدالله‌زاده*^۲

۱- دانشگاه صنعتی امیرکبیر p.ghobadi@aut.ac.ir

۲- استادیار دانشگاه کاشان abdzad@aut.ac.ir

(دریافت ۲۶ شهریور ۱۳۹۱، پذیرش ۶ شهریور ۱۳۹۲)

چکیده

تعیین مقدار پارامترهای مختلف در یک مدار فرآوری از طریق اندازه‌گیری مستقیم یا نمونه‌گیری امری رایج برای بررسی پایداری مدار و تشخیص خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بخش‌های مختلف آن است. اما با توجه به وجود خطاهای سیستماتیک، تصادفی و یا اتفاقی در هنگام اندازه‌گیری، همواره مقادیر اندازه‌گیری شده دقیق و صحیح نیستند. اگرچه با اندازه‌گیری مجدد و تکرار نمونه‌گیری می‌توان مقادیر مذکور را تصحیح و خطاهای احتمالی را حذف نمود، اما باید توجه داشت که انجام مجدد مراحل نمونه‌گیری و آنالیز نمونه علاوه بر زمان‌بر بودن، هزینه‌بر نیز می‌باشد. بکارگیری روش‌های محاسباتی از جمله معادلات موازنه جرم برای بررسی صحت داده‌های در اختیار و در صورت نیاز تصحیح آنها به عنوان روشی سریع و کم هزینه بسیار حائز اهمیت خواهد بود. از آنجایی که معمولاً بیش از یک متغیر (دبی جریان مواد) برای اطلاع از عملکرد متالورژیکی مدار اندازه‌گیری می‌شود، برقراری معادلات موازنه جرم از حالت خطی خارج شده و محاسبات پیچیده می‌گردد. از این رو، در تحقیق حاضر به ارائه روشی سریع و قابل اعتماد برای برقراری موازنه جرم در حالت چند خطی و تصحیح مقادیر اندازه‌گیری شده چند متغیر مختلف در یک مدار فرآوری با بکارگیری یک الگوریتم سلسله مراتبی پرداخته می‌شود. همچنین به منظور ارزیابی قابلیت روش مذکور، مقادیر اندازه‌گیری شده دبی حجمی، عیار و دانسیته یک مدار فلوتاسیون در قالب مدار نمونه، مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی

اصلاح داده‌ها، موازنه جرم چند خطی، فلوتاسیون، الگوریتم سلسله مراتبی

مقدمه

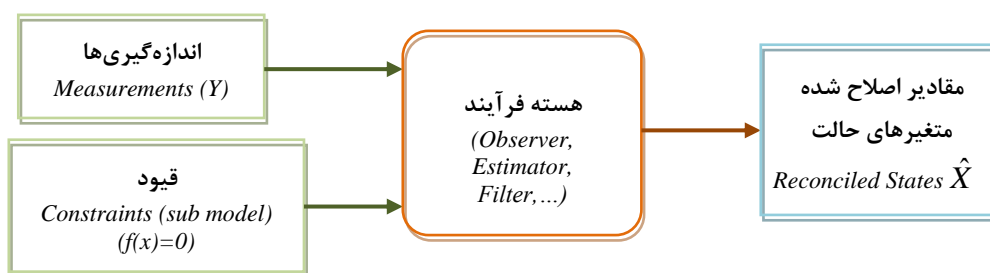
می‌گردند تا خطای احتمالی تعدیل شود [۱]. هدف از جمع آوری داده‌ها دستیابی به اهداف زیر می‌باشد:

- ۱- ارزیابی فرآیند و بررسی عملکرد آن
- ۲- تشخیص خطاهای احتمالی موجود
- ۳- نظارت پیوسته^۵ بر مدار جهت تصمیم‌گیری مناسب
- ۴- مدل‌سازی فرآیندهای موجود و پیش‌بینی نتایج
- ۵- کنترل خودکار مدار به واسطه نظارت پیوسته بر آن
- ۶- بهینه‌سازی مدار به صورت لحظه‌ای و در زمان واقعی جهت دستیابی به اهداف فوق، تخمین شرایط فرآیند ضروری است. در تمام مقیاس‌های آزمایشگاهی، نیمه‌صنعتی و یا صنعتی، اولین قدم برای تخمین شرایط، جمع‌آوری مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد. اما باید توجه داشت که اندازه‌گیری در مقیاس صنعتی بسیار مشکل است. زیرا در اغلب موارد، فرآیندهای فرآوری مواد حاوی چندین فاز غیریکنواخت بوده و از این رو داده‌ها تا حد زیادی نادرست و ناقص هستند و باید قبل از استفاده در مدل‌های کمی اصلاح شوند.

در شکل ۱ شمای کلی فرآیند اصلاح داده‌ها نشان داده شده است. هسته اصلی این فرآیند یک الگوریتم محاسباتی است که می‌تواند واحد نظارت، تخمین و یا فیلتر باشد. در سیستم نظارت، رفتار فرآیند و عملکرد آن از طریق کنترل متغیرها بررسی می‌شود. به وسیله واحد تخمین، می‌توان ضرورت و یا امکان‌پذیر بودن اندازه‌گیری مقادیر کمی متغیرهای حالت را برآورد نمود. در صورتی که هسته یک فیلتر باشد، مقدار اندازه‌گیری شده متغیر حالت را می‌توان تصحیح نمود. لازم به ذکر است که در این پژوهش، واژه‌های تخمین، فیلتر، مشاهده و اصلاح داده به صورت مترادف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل مذکور، Y بردار اندازه‌گیری، X بردار متغیر حالت و \hat{X} مقدار اصلاح شده متغیر مذکور است. روابط مربوط به قیود که به صورت $f(X)=0$ بیان می‌گردد نیز یکی از الگوریتم‌های مدل است که قبلاً به آن اشاره شد.

در مدارهای فرآوری، حفظ شرایط عملیاتی در محدوده‌ای که در آن، شاخص‌های عملکرد مدار دارای مقادیر بهینه باشند، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. این شاخص‌ها را می‌توان با عوامل کمی مانند تناژ ماده بارزش و یا با متغیرهای کیفی مانند عیار کنسانتره بیان کرد. از آنجا که موازنه بین بهره‌وری، کیفیت محصول و هزینه‌های تولید آن ضروری است، لذا عملکرد یک واحد غالباً به صورت یک شاخص اقتصادی بیان می‌گردد که در بر گیرنده همه جنبه‌های مذکور است زیرا هنگامی که شرایط عملیاتی مدار از محدوده عملکرد بهینه دور می‌شود، کارخانه دچار ضررهای اقتصادی زیادی می‌گردد. توانایی حفظ مدار در محدوده شرایط عملیاتی بهینه، مستلزم تصمیم‌گیری لحظه‌ای به واسطه سیستم‌های نظارت بر فرآیند، بهینه‌سازی در زمان واقعی^۱ و رویکردهای کنترل خودکار^۲ می‌باشد. کاملاً واضح است که هدف همه رویکردهای مذکور، پایداری مدار حول شرایط بهینه با حداقل نوسان (واریانس کمتر حول مقدار تخمینی) می‌باشد.

به منظور بررسی شرایط عملیاتی مدار، بهینه‌سازی و نیز شناسایی و حذف خطاهای احتمالی، از مقادیر اندازه‌گیری شده متغیرهای فرآیند استفاده می‌شود. متغیرهای عمده در یک مدار فرآوری عبارتند از: دبی، عیار، دانسیته، درصد جامد و انرژی مصرفی (توان کشی). شایان ذکر است که تحلیل شرایط مدار با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری و قرار دادن آنها در مدل‌های محاسباتی (برای تعیین شاخص عملکرد مدار) صورت می‌گیرد. در این مدل‌ها باید مسائلی مانند شرایط عدم قطعیت حاکم بر فرآیند، نبود مقدار اندازه‌گیری برای برخی از متغیرهای بحرانی، اطلاعات محدود مرتبط با رفتار فرآیند و درجه افزونگی^۳ مقادیر اندازه‌گیری شده لحاظ گردد. شرط مطلوب برای رفع مشکلات و مسائل مذکور هنگام استفاده از مدل‌های کمی فرآیندی، بکارگیری قوانین مربوط به موازنه جرم است. در صنایع مرتبط با مهندسی شیمی و فرآوری مواد معدنی، این روش‌های تحلیل و بررسی داده‌ها را رویکردهای اصلاح داده^۴ می‌نامند. زیرا در مدل‌های موجود، مقادیر اندازه‌گیری شده در قالب روابط موازنه جرم، اصلاح



شکل ۱: شمای کلی فرآیند اصلاح داده‌ها با استفاده از روابط موازنه جرم [۱]

اشاره نمود [۱]، [۵].

رایج‌ترین روش اصلاح داده براساس بهینه‌سازی فرآیند با استفاده از شاخص‌های درجه دوم توسعه یافته است که در آن فرض می‌شود مسائل مربوط به عدم قطعیت‌ها به توزیع گوسین مرتبط است (لحاظ نمودن مسائل مرتبط با عدم قطعیت حاکم بر مدار). در این تحقیق نیز از رویکرد مذکور استفاده می‌شود. اگرچه روش‌های دیگری بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز پیشنهاد شده است، اما در این روش‌ها اصول فیزیکی حاکم بر فرآیند، مورد توجه قرار نگرفته و قابلیت اطمینان نتایج آنها نیز کمتر از رویکردهای ارزیابی تحلیلی روش مورد بررسی در این پژوهش است [۸]-[۱۰]. روش‌های اصلاح داده ایستا در شرایط خارج خط و روی خط فرآیندهایی مانند خردایش، فلوتاسیون، استخراج طلا، هیدرومتالورژی، پیرومتالورژی و آماده‌سازی سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین روش‌های پایا که در آنها عدم قطعیت‌های مدل و خطاهای اندازه‌گیری نیز به صورت توأم لحاظ شده، گسترش یافته‌اند اما هنوز بطور وسیع کاربرد ندارند. شایان ذکر است که اگرچه روش‌های پویا برای اصلاح داده‌ها در شرایط بسیار متغیر نیز پیشنهاد شده، اما استفاده از آنها در مقیاس صنعتی هنوز در حال بررسی است [۱۱]-[۱۳].

هدف از این تحقیق ارائه یک الگوریتم و کاربرد آن برای حل مسئله اصلاح داده‌ها در یک مدار مورد مطالعه، در شرایطی که بیش از دو متغیر (حالت دوخطی) در مدار اندازه‌گیری می‌شود، بوده است. روش پیشنهادی در این تحقیق، تلفیقی از روش‌های متداول پس از انجام تغییرات لازم و الگوریتم سلسله مراتبی برای حل مسئله بوده که قابلیت توسعه مدل تا n متغیر، را دارا است.

مهم‌ترین مزایای بکارگیری رویکرد اصلاح داده‌ها عبارتند از [۲]:

- ✓ تخمین مقادیر اندازه‌گیری نشده
- ✓ تصحیح مقادیر اندازه‌گیری شده
- ✓ صادق بودن مقادیر اصلاح شده در روابط موازنه جرم (کمینه شدن میزان خطاها)
- ✓ مستقل بودن مقدار شاخص عملکرد فرآیند مانند بازیابی از روش محاسبه آن با استفاده از این روش
- ✓ دستیابی به نتایجی با قابلیت اعتماد بالا نسبت به سایر مدل‌ها و روش‌ها
- ✓ واقع‌بینانه‌تر بودن مدل‌های فرآیندی بدست آمده از داده‌های اصلاح شده نسبت به سایر روش‌ها
- ✓ کاراتر بودن فرآیند تصمیم‌گیری با استفاده از داده‌های اصلاح شده نسبت به داده‌های خام

۱-۱- مروری بر تحقیقات پیشین

اصلاح داده‌های خام با استفاده از روابط موازنه جرم تکنیکی است که به مدت طولانی در واحدهای فرآوری مواد معدنی مورد مطالعه قرار گرفته است [۲]-[۶]. در این مطالعات سعی شده که این مسئله در شرایط مختلفی که ممکن است در واحدهای عملیاتی با آنها برخورد شود از جمله افزایش تعداد متغیرهای مورد مطالعه، رابطه این متغیرها با یکدیگر از نظر خطی یا غیر خطی بودن و در شرایط ایستا^۱ یا پویا^۲، حل شود. آخرین کتاب منتشر شده در این زمینه "مرجع [۱]" این پژوهش می‌باشد که در سال ۲۰۱۰ انتشار یافته است. امروزه اصلاح داده‌ها در شرایط خارج از خط^۳ برای فرآیندهای پایدار بسیار رواج یافته و بسته‌های نرم‌افزاری مختلفی بدین منظور در دسترس است. از جمله بسته‌های کاربردی در این زمینه می‌توان به "محاسبه‌گر متالورژیکی و بیلمت^۴"، "JKMultibal" ، "موازن" [۷] و سایر نرم‌افزارهای رایج در مهندسی شیمی

خواهد بود. به عنوان مثال مدار شکل ۲، ماتریس سیستم مدار یک ماتریس 3×6 به صورت زیر خواهد بود.

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

۲-۱-۳- قیود چندخطی^{۱۱}

اندازه‌گیری متغیرهای فرآیند معمولاً در برگرنده مقادیری برای دبی مواد و عیار گونه‌های موجود در پالپ است. در این موارد، شرایط فرآیند با دو متغیر تعریف شده و در روابط دوخطی (دو متغیره) بیان می‌گردد. اما هنگامی که عملکرد واحدهای فرآوری یا متالورژی باید به صورت دقیق‌تر و عمیق‌تر تعیین شود، به اطلاعات مربوط به بیش از دو متغیر نیاز است. از سوی دیگر، جریان مواد دارای فازهای مختلفی مانند ماده معدنی خشک، پالپ، مواد شیمیایی و فاز گاز است که با خصوصیات مثل دبی، دانسیته ذرات، درصد جامد و توزیع اندازه ذرات تعریف می‌گردد و هریک از آنها اطلاعات مفیدی برای اصلاح دقیق داده‌ها در اختیار می‌گذارد. با توجه به مطالب فوق‌الذکر، قیود چندخطی برای حل این مسئله بیان می‌شود که در آن علاوه بر دبی و عیار، پارامترهای فیزیکی دیگری اندازه‌گیری شده و مقادیر مربوط به مجموعه‌ای از متغیرها اصلاح می‌گردد.

با افزایش جزئیات مورد نیاز برای تحلیل فرآیند، پیچیدگی روابط مربوط به موازنه جرم نیز به صورت تصاعدی افزایش

می‌یابد. حل مسئله در این شرایط با روش‌های متداول و بصورت تحلیلی میسر نیست اما با بکارگیری روش سلسله مراتبی^{۱۲} و انجام محاسبات در تکرارهای^{۱۳} متوالی می‌توان آن را حل نمود. در ادامه به اساس این روش و نحوه اصلاح مقادیر با استفاده از آن پرداخته می‌شود.

۲-۱-۴- رابطه مدل (معادلات موازنه جرم)

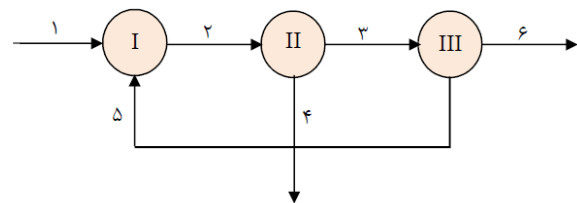
مدل (موازنه) ارائه شده برای این دسته از مسائل به صورت رابطه (۱) است. شایان ذکر است که به دلیل سهولت انجام محاسبات به روش ماتریسی در مسائل پیچیده و با حجم زیاد داده، روابط الگوریتم در این پژوهش به صورت ماتریسی بیان می‌گردند.

۲- مدل سازی مسئله و توسعه الگوریتم اصلاح داده‌ها

در شرایطی که فرآیند پایا است، روش‌های پایا را می‌توان برای اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای متغیرها و اصلاح آنها استفاده نمود. منظور از شرایط پایا هنگامی است که فرآیند تغییرات قابل ملاحظه‌ای حول مقدار پایدار نداشته باشد. به عبارت دیگر، نمونه‌گیری از مدار یا اندازه‌گیری باید در زمانی صورت گیرد که به اندازه کافی از تغییرات معنی‌دار حول شرایط عملیاتی بهینه فاصله دارد. هنگامی که فرآیند در یک رژیم انتقالی، تناوبی و یا گسسته قرار دارد، روش اصلاح دینامیکی داده‌ها باید مورد استفاده قرار گیرد تا تاخیرهای موجود بین حالت‌های مختلف فرآیند را مدنظر قرار داد [۱]. در ادامه به نحوه مدل‌سازی فرآیند اصلاح داده‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱- ترسیم مدار

قبل از شروع عملیات باید تمامی اطلاعات مرتبط با شمای کلی مدار مورد بررسی در دسترس باشد. هر فرآیند در مدار فرآوری با استفاده از یک شبکه جریان نشان داده می‌شود که در آن واحدهای موجود در فرآیند با گره و جریان مواد بین واحدها با پیکان‌هایی ترسیم می‌گردد. در واقع یک شبکه با n گره و m پیکان، بیانگر مداری با n واحد و m جریان بین آنها می‌باشد. به عنوان مثال در شکل ۲ مداری با ۳ گره (یک میکسر، واحد جدایش اولیه، واحد جدایش ثانویه) و ۶ جریان نشان داده شده است.



شکل ۲: شبکه جریان مداری با سه واحد و ۶ جریان

۲-۱-۲- ماتریس سیستم^{۱۴} مدار

پس از ترسیم شبکه جریان، باید ماتریس سیستم آن را تعریف نمود. ماتریس مذکور که از درایه‌های ۰، ۱ و -۱ تشکیل شده است، بیانگر جریان‌های موجود در مدار و نوع اتصال آنها با گره‌های مختلف (ورودی یا خروجی بودن جریان) است. ماتریس جریان برای هر مدار، یک ماتریس $(n \times m)$ است که n تعداد ردیف‌ها یا سطرهای ماتریس بوده و معادل تعداد گره‌های موجود در مدار است. m نیز بیانگر تعداد ستون‌های ماتریس و برابر با تعداد جریان‌های مدار

$$L = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^d (\|\hat{X}_j - X_j\|_{V_j^{-1}}^2 + \lambda_j^T M \prod_{i=1}^j \hat{X}_i) \quad (3)$$

or

$$L = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{(\hat{Q} - Q)^2}{V_Q} \right) + \left(\frac{(\hat{C} - C)^2}{V_C} \right) + \left(\frac{(\hat{G} - G)^2}{V_G} \right) \right] + \lambda_Q^T M Q + \lambda_G^T M (Q G) + \lambda_C^T M (Q G C) \quad (3)$$

روابط مشتق‌گیری نسبت به متغیرها و پارامترهای لاگرانژ به صورت روابط ۴ و ۵ در زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial L}{\partial \hat{X}_j} = V_j^{-1} (\hat{X}_j - X_j) + \sum_{k=1}^d (M \sum_{i=1, i \neq j}^k \hat{X}_i)^T \lambda_k = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = M \prod_{i=1}^j \hat{X}_i = 0 \quad (5)$$

برای حل مسئله و یافتن نقاط بهینه، روش سلسله مراتبی که با تکرار مراحل مختلف انجام می‌شود، مطلوب است.

۲-۲- روش حل مسئله

در روش حل سلسله مراتبی، فرض می‌شود که تخمین یک متغیر به سایر متغیرهای موجود در مدار وابسته است. از این رو با فرض اینکه تعداد متغیرها (d) برابر با ۴ باشد، آنگاه رابطه لاگرانژین (رابطه ۳) عبارت است از:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 (\|\hat{X}_j - X_j\|_{V_j^{-1}}^2 + \lambda_j^T M \prod_{i=1}^j \hat{X}_i) \quad (6)$$

در هنگام بسط رابطه (۶) و به منظور ساده‌سازی در هنگام نوشتن برنامه این مسئله، از عبارت M_{ijk} استفاده می‌گردد که عبارت است از:

$$M_{ijk} = M(\hat{X}_1, \hat{X}_j, \hat{X}_k) \rightarrow M_{ijk} = M L_i L_j L_k \quad (7)$$

در رابطه فوق، L_i یک ماتریس قطری است با بعد (۷.۷) که درایه‌های روی قطر اصلی آن مقادیر اندازه‌گیری و یا تخمینی برای متغیر i (مقادیر بردار ستونی X_i) هستند. نقاط بهینه تابع به صورت زیر محاسبه می‌گردند.

$$V_1^{-1} (\hat{X}_1 - X_1) + M_1^T \lambda_1 + M_2^T \lambda_2 + M_{23}^T \lambda_3 + M_{234}^T \lambda_4 = 0$$

$$M \hat{X}_1 = 0 \quad (8)$$

$$V_2^{-1} (\hat{X}_2 - X_2) + M_1^T \lambda_2 + M_{13}^T \lambda_3 + M_{134}^T \lambda_4 = 0$$

$$M_1 \hat{X}_2 = 0 \quad (9)$$

$$(10)$$

$$M \prod_{i=1}^j X_i = 0 \quad (j=1, \dots, d) \quad (1)$$

در رابطه فوق، M ماتریس سیستم مدار است و X_i بردار ستونی مقدار i امین متغیر با بعد (۷.۱) بوده که در آن v بیانگر تعداد جریان‌های اندازه‌گیری شده است (در اینجا همه جریان‌ها اندازه‌گیری شده اند، v معادل m است). تعداد بردارهای ستونی X_i برابر تعداد متغیرها (d) است. رابطه (۱) برای شرایطی که سه متغیر عیار C ، درصد توزیع دانه‌بندی G و دبی وزنی Q در اختیار باشد بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$M(Q, G, C) = 0$$

در رابطه فوق ضرب ماتریس M در پرانتز ضرب ماتریسی و علامت " " معرف ضرب مستقیم درایه به درایه است.

۲-۱-۵- تابع هدف

معیار کمینه کردن تحت مدل (قیود) به صورت تابع هدف تعریف می‌شود (رابطه ۲). در واقع هدف، کمینه کردن مجموع مربعات اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری با مقدار تخمین زده شده تحت قیود است. این رابطه براساس مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده تعریف می‌گردد که در آن، مقدار اصلاح شده باید تا حد امکان به مقادیر اندازه‌گیری نزدیک بوده و اختلاف آنها در مجموع به حداقل برسد. شایان ذکر است که مقادیر اصلاح شده باید در رابطه مدل صدق نموده و موازنه جرم مدار برقرار باشد. رابطه (۲) نحوه نمایش تابع هدف فوق‌الذکر را به سه شکل نشان می‌دهد که در ادامه به منظور جلوگیری از طولانی شدن روابط نحوه نمایش سوم بکار برده می‌شود.

(۲)

$$\varphi = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^d \frac{(\hat{X}_j - X_j)^2}{V_j}$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{(\hat{Q} - Q)^2}{V_Q} \right) + \left(\frac{(\hat{C} - C)^2}{V_C} \right) + \left(\frac{(\hat{G} - G)^2}{V_G} \right) \right]$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^d \|\hat{X}_j - X_j\|_{V_j^{-1}}^2$$

در رابطه فوق، X_j و \hat{X}_j به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و اصلاح شده متغیر j ام هستند. V_j نیز ماتریس قطری واریانس خطای اندازه‌گیری متغیر j ام با بعد (۷.۷) است. برای کمینه کردن φ تحت قیود با استفاده از روش لاگرانژ و نوشتن رابطه لاگرانژین به صورت زیر (رابطه ۳) و مشتق‌گیری از آن نسبت به متغیرها و پارامتر لاگرانژ می‌توان نقاط بهینه (مقادیر اصلاح شده متغیرها) را محاسبه نمود.

۲-۲-۱- فرم عمومی پاسخ مسئله

شکل کلی روابط تعیین مقادیر تخمینی برای متغیرها در حالت چندخطی و به روش سلسله مراتبی به صورت زیر است.

$$\hat{X}_{i+1} = (I - V_{i+1} M_{1...i}^T (M_{1...i} V_{i+1} M_{1...i}^T)^{-1} M_{1...i}) (X_{i+1} - V_{i+1} L_{i+2} L_{i+1}^{-1} V_{i+2}^{-1} (\hat{X}_{i+2} - X_{i+2})) \quad (16)$$

(i=0,1, ..., d-1)

در شروع الگوریتم سلسله مراتبی، با توجه به رابطه فوق لازم است که ابتدا دو سری (تکرارهای اول و دوم) مقادیر فرضی (بہتر است از همان مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده شود) به عنوان مقادیر تخمینی و اصلاح شده در نظر گرفته شود و سپس اولین سری تخمین (تکرار سوم) مقادیر متغیرها (۱) تا (d) براساس رابطه (۱۶) صورت گیرد. در تکرار بعدی، تخمین جدید مقادیر با توجه به مقادیر بدست آمده در تکرار قبلی انجام می شود. تکرار الگوریتم را می توان زمانی که اختلاف مقادیر تخمینی در دو یا چند تکرار متوالی ثابت و اندک شد، متوقف نمود. جواب نهایی به صورت یک ماتریس (v.d) خواهد بود که d تعداد متغیرها و v تعداد جریان‌ها است. اگر n تکرار انجام شود رابطه (۱۷) بدست می آید. در واقع برای هر متغیر، n مقدار تخمینی بدست خواهد آمد که با رسم نمودار می توان روند نزدیک شدن مقادیر تخمینی به یک مقدار ثابت را بررسی نمود.

$$X = \begin{bmatrix} Q_1 & C_1 & G_1 & D_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Q_n & C_n & G_n & D_n \end{bmatrix}_{((n \times v) \cdot d)} \quad (17)$$

الگوریتم اصلاح داده‌ها و مراحل انجام این فرآیند با استفاده از روش مذکور به صورت نمودار جریان نشان داده شده در شکل ۳ است. در بخش بعد به منظور ارزیابی قابلیت روش پیشنهادی در این پژوهش به بررسی فرآیند اصلاح مقادیر اندازه‌گیری شده یک مدار فلوتاسیون با استفاده از این روش پرداخته می‌شود.

$$V_3^{-1} (\hat{X}_3 - X_3) + M_{12}^T \lambda_3 + M_{124}^T \lambda_4 = 0$$

$$M_{12} \hat{X}_3 = 0 \quad (11)$$

$$V_4^{-1} (\hat{X}_4 - X_4) + M_{123}^T \lambda_4 = 0$$

$$M_{123} \hat{X}_4 = 0$$

در روابط فوق، M^T ، ترانهاده ماتریس M می‌باشد. در ادامه حل مسئله ابتدا، عبارت MV در بخش اول رابطه (۸) ضرب می‌شود. از آنجا که $M \hat{X}_j$ برابر صفر می‌باشد، پس می‌توان مقدار λ_1 را از این عبارت محاسبه نمود.

$$MV[V_1^{-1} (\hat{X}_1 - X_1) + M^T \lambda_1 + M_2^T \lambda_2 + M_{23}^T \lambda_3 + M_{234}^T \lambda_4] = 0$$

$$\lambda_1 = (MVM^T)^{-1} M(X_1 - V(M_2^T \lambda_2 + M_{23}^T \lambda_3 + M_{234}^T \lambda_4))$$

بعد از بدست آوردن λ_1 ، با ضرب عبارت V_1 در رابطه (۸) و جایگذاری λ_1 در این رابطه، مقدار \hat{X}_1 بدست می‌آید.

$$\hat{X}_1 = (I - V_1 M^T (M V_1 M^T)^{-1}) \times (X_1 - V_1 (M_2^T \lambda_2 + M_{23}^T \lambda_3 + M_{234}^T \lambda_4)) \quad (13)$$

$$\hat{X}_1 = (I - V_1 M^T (M V_1 M^T)^{-1} M) \times (X_1 - V_1 L_2 (M^T \lambda_2 + L_3 M^T \lambda_3 + L_3 L_4 M^T \lambda_4))$$

مراحل فوق به همین ترتیب برای \hat{X}_2 انجام می‌شود.

$$\hat{X}_2 = X_1 - V_2 L_1 (M^T \lambda_2 + L_3 M^T \lambda_3 + L_3 L_4 M^T \lambda_4) \quad (14)$$

مشاهده می شود که می توان رابطه ای بین دو مقدار تخمینی \hat{X}_1 و \hat{X}_2 بشرح زیر بدست آورد

$$\hat{X}_1 = (I - V_1 M^T (M V_1 M^T)^{-1} M) \times (X_1 - V_1 L_2 L_1^{-1} V_2^{-1} (\hat{X}_2 - X_2)) \quad (15)$$

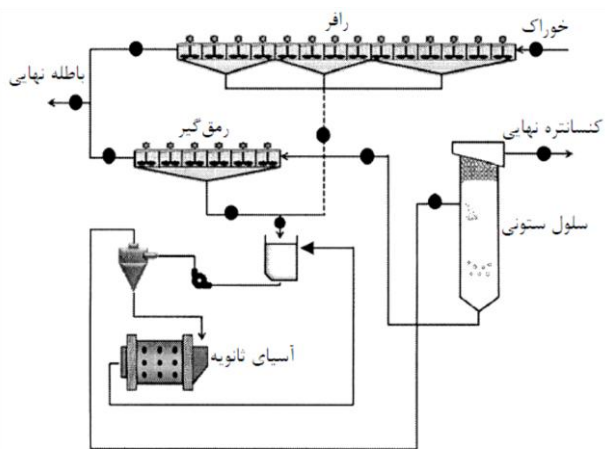
رابطه (۱۵) نشان می دهد که برای تخمین مقدار متغیر اول نیاز به تعیین مقدار تعدیل شده متغیر دوم است و یک ارتباط سلسله مراتبی برقرار می شود. به همین ترتیب می توان برای همه متغیرها و به هر تعداد که باشند یک رابطه کلی به صورت فرم عمومی زیر تعریف نمود.

۳- مطالعه موردی

برای ارزیابی قابلیت الگوریتم پیشنهادی در اصلاح مقادیر اندازه‌گیری، داده‌های مربوط به یک مدار فلوتاسیون شامل سلول‌های متداول مکانیکی و ستونی در مقیاس نیمه صنعتی [۱۴] با تغییراتی متناسب با اهداف این مطالعه از جمله فرض مقادیری برای برخی جریان‌های اندازه‌گیری نشده، مورد بررسی قرار گرفت.

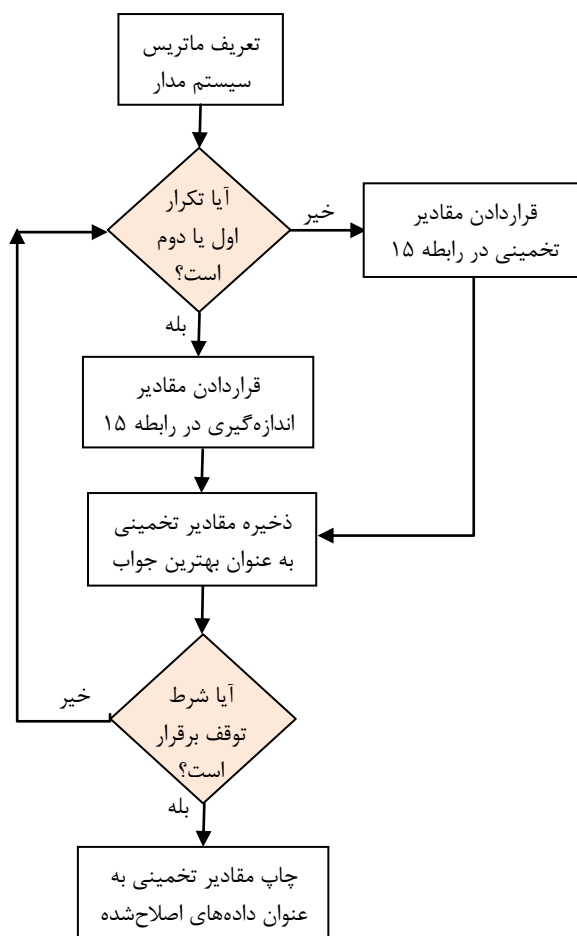
در شکل (۴) مدار مذکور با ده مسیر مشخص گردیده که در آن محل انجام نمونه‌گیری با علامت دایره نشان داده شده است.

در این مثال مقادیر اندازه‌گیری برای همه جریان‌ها موجود فرض شده و در جدول ۱ مقادیر دبی حجمی، دانسیته و عیار مس در مسیرهای مختلف آورده شده است. از آنجا که دقت اندازه‌گیری‌ها در دسترس نبوده است، برای مقادیر جدول ۱ واریانسی معادل ۵٪ مقدار عددی آنها لحاظ شده و در محاسبات برای اصلاح داده‌ها بکار برده شده است.



شکل ۴: شمای کلی مدار فلوتاسیون

شبکه جریان مدار مورد بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است.

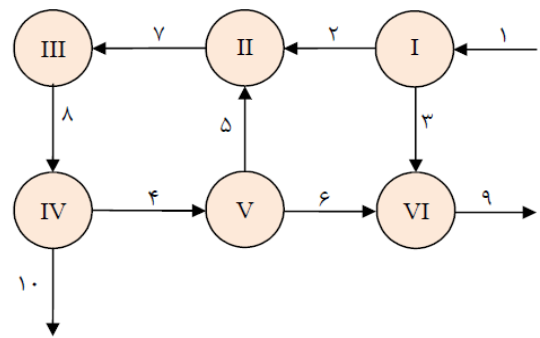


شکل ۳: الگوریتم اصلاح داده‌ها با روش سلسله مراتبی

جدول ۱: مقادیر اندازه‌گیری شده مدار مورد بررسی

شماره جریان	نام جریان	دبی حجمی (m ³ /h)	دانسیته (t/m ³)	عیار مس (%)
۱	خوراک	۶۵/۷۹	۱/۵۲	۰/۷۸
۲	کنسانتره رافر	۴۷/۵۲	۱/۴۱	۴
۳	باطله رافر	۱۹/۵۱	۱/۶۴	۰/۰۸
۴	خوراک اسکونجر	۶۲/۴۲	۱/۴۹	۳
۵	کنسانتره اسکونجر	۱۲/۸۶	۱/۴	۷
۶	باطله اسکونجر	۲۵/۶۴	۱/۱۷	۰/۰۳
۷	ورودی به مخزن مدار آسیا	۵۵/۳۸	۱/۶	۸
۸	خوراک ستون	۲۵/۶۴	۱/۵۶	۸/۵
۹	باطله نهایی	۲۸/۶۷	۱/۵	۰/۱
۱۰	کنسانتره ستون	۱/۸۲	۱/۶۵	۲۰

نتایج اجرای الگوریتم بر روی داده های جدول (۱) در جدول (۳) آورده شده است. همچنین در جدول (۴) مقدار اصلاح متغیرها براساس درصد (نسبت اختلاف مقدار اندازه-گیری و تخمینی به مقدار اولیه) آورده شده است. براساس نتایج جدول (۴) در مورد برخی از مقادیر از جمله دبی ها و تعدادی از عیارها تغییرات قابل ملاحظه ای مشاهده می شود که علت آن را می توان یکی در انتخاب عددی فرضی برای برخی جریان ها و میزان دقت اندازه گیری ها بدلیل در اختیار نبودن مقدار واقعی آن ها دانست زیرا مطابق رابطه (۲) میزان تعدیل به مقدار واریانس و دقت اندازه گیری بستگی دارد. هر چه دقت اندازه گیری متغیری بیشتر باشد میزان تعدیل آن متغیر کاهش می یابد.



شکل ۵: شبکه جریان مدار مورد بررسی

اسامی گره ها نیز به ترتیب شماره گذاری در جدول ۲ عنوان شده است.

جدول ۲: مشخصات گره های شبکه جریان مدار مورد بررسی

شماره گره	نام گره
I	رافر
II	نقطه اختلاط کنسانتره رافر و رمق گیر
III	مخزن
IV	سلول ستونی
V	اسکونجر
VI	نقطه اختلاط باطله رافر و رمق گیر

جدول ۳: مقادیر اصلاح شده برای متغیرهای مدار مورد بررسی

شماره جریان	نام جریان	دبی حجمی	دانشیته	عیار مس (%)
۱	خوراک	۴۶/۳۳	۱/۵۴	۱/۰۹
۲	کنسانتره رافر	۳۱/۰۹	۱/۵۳	۱/۵۹
۳	باطله رافر	۱۵/۲۴	۱/۶۵	۰/۰۹
۴	خوراک اسکونجر	۴۰/۸۹	۱/۴۹	۲/۷۸
۵	کنسانتره اسکونجر	۱۲/۰۲	۱/۴۹	۹/۳۷
۶	باطله اسکونجر	۲۸/۸۸	۱/۲	۰/۰۳۷
۷	ورودی به مخزن مدار آسیا	۴۳/۱۱	۱/۵۰	۳/۷۶
۸	خوراک ستون	۴۳/۱۱	۱/۵۰	۳/۷۶
۹	باطله نهایی	۴۴/۱۲	۱/۴۵	۰/۰۶
۱۰	کنسانتره ستون	۲/۲۲	۱/۵۴	۲۱/۷۸

همانطور که گفته شد، اولین مرحله در فرآیند اصلاح داده ها پس از ترسیم شبکه جریان مدار، نوشتن ماتریس سیستم آن می باشد. با توجه به اینکه تعداد متغیرها و جریان های اندازه-گیری شده در این مثال به ترتیب برابر با ۳ و ۱۰ عدد هستند، برنامه مربوط به اصلاح داده ها با استفاده از روش سلسله مراتبی و براساس روابط ذکر شده در بخش مدل-سازی، در نرم افزار مطلب [۱۵] نوشته شد. ماتریس سیستم مدار مذکور نیز به صورت زیر است.

جریان/گره	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
II	0	+1	0	0	+1	0	-1	0	0	0
III	0	0	0	0	0	0	+1	-1	0	0
IV	0	0	0	-1	0	0	0	+1	0	-1
V	0	0	0	+1	-1	-1	0	0	0	0
VI	0	0	+1	0	0	+1	0	0	-1	0

جدول ۴: درصد تغییرات برای متغیرهای مدار مورد بررسی

شماره جریان	نام جریان	دبی حجمی (%)	دانسیته (%)	عیار مس (%)
۱	خوراک	۲۹/۶	-۱/۳	-۳۹/۷
۲	کنسانتره رافر	۳۴/۶	-۸/۵	۶۰/۳
۳	باطله رافر	۲۱/۹	-۰/۶	-۱۲/۵
۴	خوراک اسکونجر	۳۴/۵	۰	۷/۳
۵	کنسانتره اسکونجر	۶/۵	-۶/۴	-۳۳/۹
۶	باطله اسکونجر	-۱۲/۶	-۲/۶	-۲۳/۳
۷	ورودی به مخزن مدار آسیا	۲۲/۲	۶/۳	۵۳/۰
۸	خوراک ستون	-۶۸/۱	۳/۸	۵۵/۸
۹	باطله نهایی	-۵۳/۹	۳/۳	۴۰/۰
۱۰	کنسانتره ستون	-۲۲/۰	۶/۷	-۸/۹

جدول ۵: موازنه مدار با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده

گره	MQ	MQD	MQDG
I	-۱/۲	-۱۴۰/۳	-۱۹۲/۶
II	۵/۰	-۱۶۲/۹	-۳۱۴/۸
III	۲۹/۷	۲۲۵/۱	۳۶۸/۹
IV	-۳۸/۶	-۵/۷	۰/۹
V	۲۳/۹	۹۶/۵	۱۵۲/۱
VI	۱۶/۵	-۰/۵	-۰/۸

جدول ۶: موازنه مدار با استفاده از مقادیر اصلاح شده

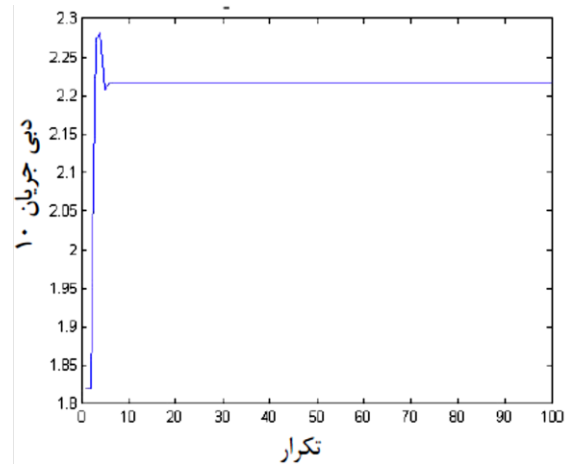
گره	MQ	MQD	MQDG
I	-3.6×10^{-15}	4.9×10^{-15}	2.2×10^{-14}
II	-7.1×10^{-15}	-2.8×10^{-14}	-2.8×10^{-14}
III	-7.1×10^{-15}	2.8×10^{-14}	-2.8×10^{-14}
IV	1.2×10^{-14}	-2.8×10^{-14}	-1.4×10^{-14}
V	-3.6×10^{-15}	2.9×10^{-14}	2.7×10^{-14}
VI	0	0	4.4×10^{-16}

در جداول فوق، MQ، MQD، و MQDG به ترتیب عبارتند از موازنه دبی حجمی مواد، موازنه دبی وزنی مواد و موازنه وزنی فلز مس. براساس نتایج بدست آمده، کاملاً واضح است که عدم موازنه مقادیر اندازه‌گیری شده زیاد بوده اما داده‌های اصلاح شده کاملاً در معادلات موازنه مدار صدق می‌کنند. نکته دیگر در خصوص الگوریتم ارائه شده، بررسی عملکرد آن در نزدیک شدن مقادیر تخمینی به یک عدد ثابت و پایداری آن است بدین منظور به عنوان نمونه، روند اصلاح مقادیر اندازه‌گیری مربوط به جریان شماره ۱۰ (کنسانتره ستون) در شکل ۶ آورده شده است. محور افقی نشان دهنده تعداد تکرارهای الگوریتم سلسله مراتبی است همانطور که مشاهده می‌شود پس از حدود ۱۰ تکرار، دبی کنسانتره از ۱/۸ به ۲/۲۲ مترمکعب بر ساعت تغییر نموده و در تکرارهای بعدی بدون تغییر باقی مانده است. در این مثال ادامه تکرار الگوریتم تا ۱۰۰ تکرار به منظور حصول اطمینان از پایداری نتایج و عدم تغییر آن و نیز از جنبه مطالعاتی بوده است. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد می‌توان با برقراری یک دستور توقف توسط کاربر در صورتی که در چند تکرار متوالی تغییری در مقدار بدست آمده مشاهده نشد از ادامه تکرارهای اضافی خودداری کرد.

همچنین حضور داده‌های خطا می‌تواند سبب تغییرات زیاد در داده‌ها شود. از آنجایی که برقراری موازنه و تعدیل براساس مقادیر موجود صورت می‌گیرد حضور داده خطا می‌تواند بر روی مقدار تعدیل سایر متغیرها نیز تاثیر بگذارد. در واقع در اصلاح داده‌ها فرض بر آن است که خطاهای اتفاقی همراه اندازه‌گیری‌ها، تصحیح می‌گردند اما اگر خطاهای سیستماتیک و بزرگ نیز وجود داشته باشند از طریق میزان تصحیح و توسط الگوریتم‌های خاصی می‌توان آنها را شناسایی نمود. لازم بذکر است که یکی از عمده‌ترین روش‌های یافتن داده‌های خطا در میان سری داده‌های در اختیار از طریق بررسی همین میزان تغییر و تعدیل می‌باشد اما از آنجایی که هدف این مقاله ارائه الگوریتمی برای حل مسئله اصلاح داده‌ها در شرایط در اختیار بودن مقادیر اندازه‌گیری شده چند متغیر و معادلات موازنه چند خطی و سپس ارزیابی قابلیت کاربرد آن بر روی یک مطالعه موردی بوده است، به شناسایی خطاها پرداخته نشده است. در جداول (۵) و (۶) به ترتیب نتایج بکاربردن مقادیر اندازه‌گیری شده و اصلاح‌شده در معادلات موازنه چند خطی مشاهده می‌شود. مقدار باقی مانده معادلات موید میزان تبعیت هر یک از دو سری داده‌ها است.

معیار عملکرد مدار

- ✓ ارزیابی صحت مقادیر اصلاح شده با استفاده از معادلات موازنه جرم
- ✓ استفاده از مقادیر اصلاح شده در محاسبات و تعیین شاخص‌های عملکرد مدار مثل عیار و بازیابی کنسانتره با قابلیت اعتماد بالا
- ✓ تعیین محل مناسب برای نصب حسگرها و تجهیزات نمونه‌گیری بر اساس حساسیت متغیرها
- ✓ تخمین مقدار متغیرهای مورد نیاز در محل‌هایی از مدار که امکان اندازه‌گیری آنها بدلیل فنی یا اقتصادی میسر نبوده است



شکل ۶: تغییر دبی جریان ۱۰ نسبت به تکرار فرآیند اصلاح داده‌ها

۴-۱- پیشنهادات

به دلیل قابلیت اطمینان بالای داده‌های اصلاح شده، می‌توان از آنها برای بهبود فرآیند بهینه‌سازی دستی و یا خودکار مدار استفاده نمود. بدین منظور، با تلفیق فرآیند اصلاح دینامیکی داده‌ها و سیستم نظارت و کنترل می‌توان روند کنترل مدار را به صورت کارتر انجام داد. بعلاوه از روند اصلاح داده‌ها می‌توان برای شناسایی خطاها و حذف آنها نیز استفاده نمود. طراحی و تعیین محل نصب تجهیزات نیز یکی دیگر از موارد کاربرد نتایج حاصل از فرآیند اصلاح داده است. علاوه بر موارد مذکور، لازم به ذکر است که در برخی از نقاط مدار، انجام نمونه‌گیری مشکل بوده و غالباً مقادیر اندازه‌گیری برای این جریان‌ها در دسترس نیست. از این رو، باید از روش‌های اصلاح داده‌ها و پیش‌بینی مقادیر اندازه‌گیری نشده استفاده نمود.

البته در این پژوهش تنها به نحوه اصلاح داده‌های با همه مقادیر در دسترس، پرداخته شده است و روند اصلاح داده‌ها، پیش‌بینی مقادیر اندازه‌گیری نشده و شناسایی داده‌های مشکوک به خطا در پژوهش‌های آتی نویسندگان مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان از آقای مهندس نخعی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- مراجع

[1] Sbarbaro, D., Del Villar, R.; 2010; "Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants", 1th ed., Springer London Dordrecht

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، الگوریتمی برای اصلاح داده‌های خام حاصل از اندازه‌گیری متغیرهای مختلف از روی یک مدار فرآوری با استفاده از روش کمترین مربعات وزن دار و تحت قیود معادلات موازنه جرم در حالت چند خطی با بکارگیری راه حل سلسله مراتبی و تکرار مراحل ارائه شد. با تصحیح مقادیر اندازه‌گیری شده دبی حجمی، دانسیته و عیار جریان‌های یک مدار فلوتاسیون، به بررسی قابلیت روش پیشنهادی برای اصلاح داده‌ها در مدارهای فرآوری پرداخته شد. نتایج بدست آمده پس از اصلاح مقادیر اندازه‌گیری شده مدار نمونه و ارضای معادلات موازنه جرم مدار به خوبی قابلیت روش مذکور را نشان می‌دهد.

فرآیند اصلاح داده‌ها یک روش محاسباتی سریع و ساده است که می‌توان با استفاده از آن به صورت کارا خطاهای مترتب به دقت ابزار اندازه‌گیری یا نمونه‌گیری‌ها را شناسایی و تصحیح نمود و نیز تخمینی دقیقتر از مقادیر واقعی بدست آورد. مزیت این روش در هزینه و زمان کم مورد نیاز جهت دستیابی به نتایج مطلوب برای بهینه‌سازی شرایط عملیاتی مدار است. زیرا برای شناسایی خطا در مقادیر اندازه‌گیری و اصلاح آنها با روش‌های آزمایشگاهی باید نمونه‌گیری را تکرار نمود که این امر علاوه بر هزینه‌های مربوط به نمونه‌گیری و آنالیز نمونه‌ها، بسیار زمان‌بر خواهد بود. مواردی که با اصلاح داده‌های اندازه‌گیری شده در مدارهای فرآوری قابل دستیابی است، عبارتند از:

- ✓ تشخیص خطای نمونه‌گیری و ارزیابی فاکتور وزن‌دهی به شاخص اصلاح متغیرهای مختلف براساس تاثیر آنها در

operations”, Academic Press.

- [10] Du, YG., Hodouin, D., Thibault, J.; 1997a; “Use of a novel autoassociative neural network for nonlinear steady-state data reconciliation”, *AIChE Journal*, Vol. 43, No. 7, pp. 1785–1796.
- [11] Du, YG., Thibault, J., Hodouin, D.; 1997b; “Data reconciliation for simulated flotation process”, *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 357–364.
- [12] Aldrich, C., Van Deventer, J.; 1994; “Identification of gross errors in material balance measurements by means of neural nets”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 49, No. 9, pp. 1357–1368.
- [13] De Andrade, LRP.; 2006; “Nonlinear data reconciliation in gold processing plant”, *Minerals Engineering*, Vol. 19, pp. 938–951.
- [14] Nakhaei, F.; 2010; “Prediction of grade and recovery of copper-molybdenum column flotation circuit by using neural net work”, *Engineering Dep. Shahid Bahonar University, Kerman*.
- [15] MATLAB 7.12, software, the MathWorks, R2011a

زیر نویس ها

Heidelberg.

- [2] Hodouin, D., Vaz Coehlo, S.; 1987; “Mass balance calculations around mineral processing units using composition analyses within particle-size classes”, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 21, pp. 65–82.
- [3] Wiegel, RL.; 1972; “Advances in mineral processing material balances”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 11, No. 2, pp. 413–424.
- [4] Hodouin, D., Everell, MD.; 1980; “A hierarchical procedure for adjustment and material balancing of mineral process data”. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 7, No. 2, pp. 91–116.
- [5] Kuehn, DR., Davidson, H.; 1961; “Computer control II: Mathematics of control”, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 57, No. 6, pp. 44–47.
- [6] Crowe, CM.; 1996; “Data reconciliation-progress and challenges”, *Journal of Process Control*, Vol. 6, pp. 89–98.
- [7] Banisi, S.; 2001; “Mass balance of mineral processing circuits”, *Hormozgan University Pub.*
- [8] Narasimhan, S., Jordache, C.; 1999; “Data reconciliation & gross error detection: an intelligent use of process data”, *Gulf Pub. Co., Houston*.
- [9] Romagnoli, JA., Sanchez, MC.; 2000; “Data processing and reconciliation for chemical process

¹ Real-Time Optimization

² Automatic Control

⁴ Data Reconciliation

⁵ Monitoring

⁸ Off-line

⁹ Bilmat and Metallurgical Accountant

¹¹ Multi-Linear Constraints