

پیش‌بینی و تصحیح بلادرنگ خطای تجزیه گر فلونئورسانس اشعه ایکس در عیارسنجی پیوسته عناصر با استفاده از تخمین گر بهینه

فردیس نخعی^{۱*}، عباس سام^۲، سید محمدرضا موسوی^۳، آزاده نخعی^۴

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران*

۴- کارشناس ارشد برق، دانشگاه پیام نور تهران

(دریافت ۹ اسفند ۹۰، پذیرش اردیبهشت ۹۲)

چکیده

یکی از عوامل مهم در عملیات فرآوری مواد معدنی، میزان عیار عناصر است. نتایج اندازه‌گیری عیار عناصر، در کنترل صحت عملیات، محاسبه بازبایی و بررسی جنبه‌های اقتصادی فرآیند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های جدید عیارسنجی، شامل روش‌های شیمیایی، فلونئورسانس اشعه ایکس (XRF) و اسپکترومتری جذب اتمی، پیشرفته و دقیق هستند. با این وجود در برخی از کاربردها از قبیل عیارسنجی‌های پیوسته، نیاز به دقت بیشتری است. در مقاله حاضر روشی مبتنی بر یک تخمین گر بهینه (ماتریس انتقال متغیر) به منظور پیش‌بینی و تصحیح خطای تجزیه گر XRF ارائه شده است. این تحقیق بر اساس داده‌های واقعی در مقیاس صنعتی، به منظور کارایی روش پیشنهادی صورت گرفته است. در پیش‌بینی با استفاده از روش مذکور، مقدار موثر خطای عیار مس و مولیبدن در خوراک ورودی واحد پرعیارکنی اولیه مدار فلوتاسیون، به ترتیب، کمتر از ۰/۱۹ و ۰/۰۰۶ و در کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون، کمتر از ۲/۴۸ و ۰/۲۷۴، حاصل شد. نتایج حاصل از آزمون داده‌های واقعی نشان می‌دهند که روش ماتریس انتقال متغیر، در پیش‌بینی و تصحیح خطاهای اندازه‌گیری تجزیه گر پیوسته، دسترسی به عیارسنجی دقیق تر را تضمین می‌کند.

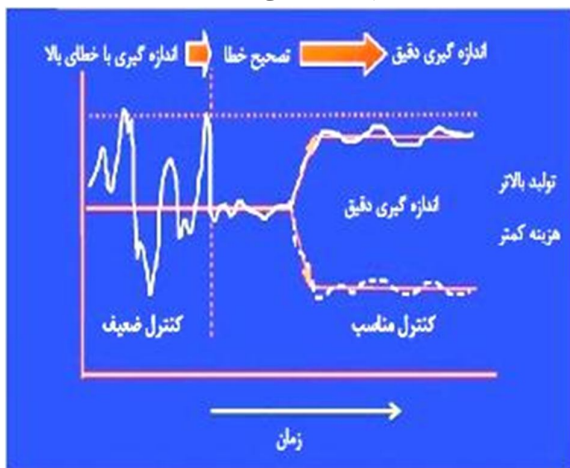
کلمات کلیدی

تصحیح، دقت، فلونئورسانس اشعه ایکس، تخمین گر بهینه، ماتریس انتقال متغیر، عیارسنجی

۱- مقدمه

کنترل فرآیند فلوتاسیون به عنوان تابعی از دقت اندازه‌گیری و تعداد نمونه‌برداری در واحد زمان، در خصوص تجزیه گر پیوسته را مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌ها نشان داده است که در فواصل زمانی طولانی اندازه‌گیری نمونه‌ها، احتمال تغییرپذیری در خصوصیات پالپ، میزان مصرف عامل‌های شیمیایی و مواد مصرفی دیگر در خلال فرآیند، قبل از اندازه‌گیری زیاد است که سبب بروز خطا می‌شود. همچنین، زمان اندازه‌گیری خیلی کوتاه، باعث افزایش خطای تجزیه گر و کاهش کنترل مناسب فرآیند می‌گردد [۳]. Cooper در سال ۱۹۷۶ و Flintoff در سال ۱۹۹۲، ارتباط بین دقت تجزیه گر پیوسته و کنترل عیار-بازیابی بر جنبه‌های اقتصادی عملیات فلوتاسیون را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند، بدون شناخت و درک لازم از میزان خطای عیارسنجی پیوسته عناصر، کنترل عملیات مشکل و مستلزم هزینه‌های زیادی خواهد بود [۹][۱۰].

مهم‌ترین هدف کنترل فرآیند، حفظ عیار و بازیابی مناسب، به عنوان شاخص بهره‌وری و کیفیت محصول است. این اهداف به دلیل ضعف در ابزارهای اندازه‌گیری و عدم وجود مدل‌های دقیق و توانا برای گزارش عملکرد متالورژیکی فرآیند به درستی اندازه‌گیری نمی‌شوند و کنترل ضعیف عملیات را به دنبال دارند. شکل ۱ دیاگرام کلی اندازه‌گیری عیار عناصر و کنترل عملکرد سیستم را نشان می‌دهد.

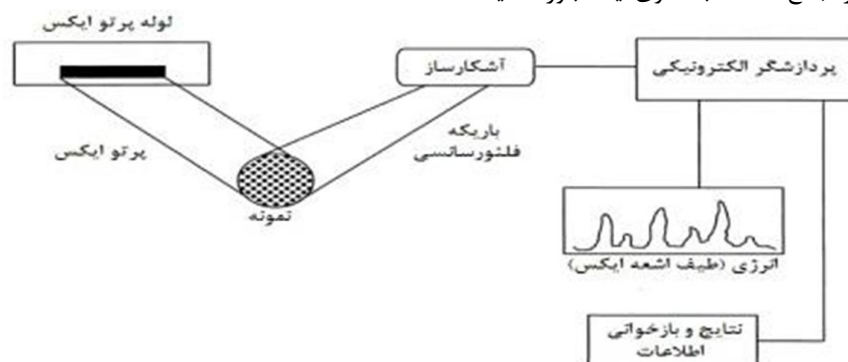


شکل ۱: دیاگرام کلی کنترل فرآیند.

تاکنون بخش عمده مطالعات، بر روی اهمیت دقت سیستم‌های تجزیه گر پیوسته در کنترل عملیات فلوتاسیون، انجام شده است و گزارشی در زمینه پیش‌بینی و تصحیح خطای این سیستم‌ها منتشر نشده است. در این مقاله روشی

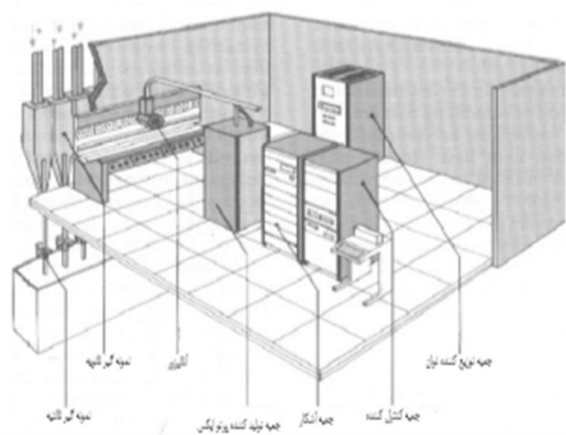
در ابتدا، عیارسنجی مواد معدنی در جریان‌های پالپ، با جمع‌آوری نمونه‌ها و تجزیه آن‌ها به وسیله میکروسکوپ یا با دقت بیشتر، در آزمایشگاه صورت می‌گرفت [۱]. عیار و بازیابی معیارهای کنترلی هستند که در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند و در صورتی می‌توانند به خوبی کنترل شوند که عیار عناصر در عملیات به طور متناوب و دقیق اندازه‌گیری گردد. استفاده از روش‌های پیوسته تجزیه شیمیایی بر روی جریان‌های حاوی مواد در کارخانه‌های فرآوری که از حدود سال ۱۹۶۰ رایج شده است، مدیون امکان استفاده از فلوتورسانس اشعه ایکس (XRF) است. با این روش می‌توان تغییرات در کیفیت پالپ را به سرعت و به طور پیوسته تشخیص و بر اساس آن اقدام‌های مورد نیاز اصلاحی در مدار کارخانه فرآوری را انجام داد. در روش‌های غیر پیوسته با توجه به زمان مورد نیاز، برای خشک کردن و آماده سازی نمونه برداشت‌شده و در نهایت تجزیه آن در آزمایشگاه، چنین امکانی وجود ندارد [۲]. معمولاً در مدارهای فرآوری، به ویژه فلوتاسیون، از تجزیه گر X-Ray، برای اندازه‌گیری پیوسته عیار فلزات در جریان‌های پالپ استفاده می‌شود [۳]. دستگاه تجزیه گر پیوسته اشعه ایکس از نظر سرعت و هزینه‌های تجزیه نسبت به روش‌های شیمیایی برتری قابل ملاحظه‌ای دارد. همچنین، دقت و سرعت تجزیه گر پیوسته برای اندازه‌گیری عیار، تأثیر زیادی بر کنترل عملیات فلوتاسیون جهت حفظ شرایط بهینه عملیاتی دارد. از آنجا که اشعه X فقط در لایه سطحی نمونه‌ای که در تماس قرار گرفته است، نفوذ می‌کند، دقت تجزیه، به ضخامت لایه پالپ و معرف بودن آن نمونه بستگی دارد [۴]. مطالعاتی در مورد اهمیت دقت و صحت سیستم‌های تجزیه گر پیوسته به منظور کنترل عملیات فلوتاسیون انجام شده است [۵][۶]. بررسی و ارزیابی این سیستم‌ها، نظیر مناسب بودن پالپ نمونه‌گیری شده، سیستم انتقال نمونه به آشکارساز، کالیبره بودن و تمیز بودن آن در سلول‌ها با همکاری Bergh و Yianatos در سال ۲۰۰۳ انجام شده است [۷]. Leroux و Franklin در سال ۱۹۹۴، با استفاده از روش‌های آماری نحوه کالیبراسیون دستگاه‌های تجزیه XRF را توضیح دادند. عموماً کالیبراسیون توسط نمونه‌گیری، تجزیه شیمیایی نمونه‌ها و انجام همبستگی خطی چند متغیره بر روی داده‌های آزمایشی انجام می‌گیرد [۸]. رمیس و همکاران در سال ۲۰۰۷، عملکرد

می شود. طول موج های موجود در این پرتو، توسط بلور، از هم تفکیک می شوند. هر طول موج، به واسطه رابطه براگ و فاصله بین صفحات اتمی خاص خود، در زوایای خاصی منتشر می شود. لذا با چرخش بلور و بررسی اشعه های تابش یافته از بلور می توان به نوع هر عنصری که در نمونه موجود است، پی برد. همچنین، از روی طول موج به تجزیه کیفی و از روی شدت اشعه هر طول موج به تجزیه کمی می توان دست پیدا کرد [۱۱]. نحوه کلی روش XRF در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: اساس کار روش فلونورساز اشعه ایکس [۸]

مختلفی استفاده شده است. یکی از رایج ترین روش ها به این ترتیب است که از هر بخش از مدار، جریان دائمی از نمونه به ایستگاه مرکزی برقرار است. هر یک از جریان ها به سلول مجزایی وارد می شوند و تحت تأثیر اشعه ایکس قرار می گیرند [۲]. اجزا دستگاه XRF عبارتند از:



شکل ۳: اتاق اشعه ایکس برای تعیین ترکیب عنصری به صورت کمی.

مبتنی بر فیلتر کالمن (تخمین گر بهینه) به منظور پیش بینی و تصحیح میزان خطای تجزیه گر پیوسته XRF ارائه شده است.

۲- روش فلونورساز اشعه ایکس

پرتو خروجی از لوله پدید آورنده پرتو X به نمونه می تابد و در اثر بمباران، الکترون های موجود در مدار داخلی اتم خارج شده و جایگزینی این الکترون ها از مدارهای بالایی، سبب پدید آمدن پرتو X یا همان پرتو مشخصه خواهد شد. پرتو X خروجی از نمونه که در حقیقت پرتو مشخصه عنصرهای موجود در نمونه است، پس از عبور از جمع کننده به سوی یک بلور هدایت

روش های استفاده شده عملی از فلونورساز اشعه ایکس برای تجزیه شیمیایی پیوسته، سیستم های متمرکز و پراکنده هستند. در سیستم متمرکز برای تجزیه نمونه های متعددی که به حالت پالپ از قسمت های مختلف خط به ایستگاه مرکزی هدایت می شوند، تنها از یک منبع تحریک با انرژی زیاد استفاده شده و کلیه تجهیزات مورد نیاز در ایستگاه مرکزی نصب می گردند [۲]. این سیستم نیاز به عملیات دائم بر روی جریان های پالپ حمل شده به ایستگاه دارد و از آن معمولاً در کارخانه های بزرگ مانند کارخانه فرآوری مس سرچشمه، استفاده می شود. در سیستم پراکنده اندازه گیری توسط گیرنده هایی که در داخل جریان های پالپ و یا نزدیکی آنها نصب شده اند، انجام می شود. در این حالت، تحریک نمونه توسط منبع های مناسب با انرژی کم، انجام می شود. از این سیستم در کارخانه های کوچک که دارای جریان های کمتری است، استفاده می گردد [۴]. شکل ۳ اتاق اشعه ایکس در بخش فرآوری، برای تعیین ترکیب عنصری را نشان می دهد.

در سیستم تجزیه متمرکز، برای نمونه برداری از روش های

شروع می‌کنیم. معادلات حالت در فیلتر کالمن به صورت زیر هستند:

$$X_{k+1} = \phi_k \cdot X_k + W_k \quad (1)$$

که در آن X_k مبین بردار $(n \times 1)$ حالت فرآیند در زمان t_k ، ϕ_k مبین ماتریس انتقال $(n \times n)$ از X_k به X_{k+1} و W_k مبین بردار $(n \times 1)$ خطای فرآیند (یک نویز سفید با تابع هم پراش مشخص فرض می‌شود)، می‌باشند [۱۰]. معادلات اندازه‌گیری در فیلتر کالمن به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$Z_k = H_k \cdot X_k + V_k \quad (2)$$

که در آن Z_k مبین بردار $(m \times 1)$ اندازه‌گیری شده در زمان t_k ، H_k مبین ماتریس $(m \times n)$ ارتباط ایده آل (بدون نویز) بین بردار اندازه‌گیری و بردار حالت در زمان t_k و V_k مبین بردار $(m \times 1)$ خطای اندازه‌گیری (یک دنباله سفید با ساختار هم پراش شناخته‌شده و با همبستگی صفر با دنباله W_k فرض می‌گردد)، می‌باشند. ماتریس هم پراش برای بردار W_k و V_k به وسیله روابط زیر تعریف می‌گردند [۱۳]:

$$E[W_k W_i^T] = \begin{cases} Q_k & ; i = k \\ 0 & ; i \neq k \end{cases} \quad (3)$$

$$E[V_k V_i^T] = \begin{cases} R_k & ; i = k \\ 0 & ; i \neq k \end{cases} \quad (4)$$

$$E[W_k V_i^T] = 0 \quad ; \quad \forall (k, i) \quad (5)$$

خلاصه الگوریتم فیلتر کالمن به صورت زیر است:

گام ۱) مقاردهی اولیه پارامترهای فیلتر کالمن به صورت زیر [۱۵]:

$$R = [\sigma_\omega^2] \quad (6)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\omega^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$S_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$H = [0 \quad 1] \quad (10)$$

گام ۲) محاسبه بهره کالمن: بهره فیلتر کالمن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

۱- لوله پدید آورنده پرتو X : لوله پرتو ایکس (لوله کولیج) رایج‌ترین منبع پرتو ایکس برای کار تجزیه‌ای است. اساساً، منبع پرتو ایکس یک لوله کاملاً تخلیه شده است که در داخل آن یک کاتد سیم تنگستن و یک آند وزین قرار گرفته است. وظیفه لوله پرتو X پدید آوردن پرتوی با شدت زیاد برای برانگیختگی همه عنصرهای موجود در نمونه مجهول است. عناصر هدف شامل فلزاتی مانند مس، مولیبدن، تنگستن، کروم، آهن و غیره می‌باشند [۱۱].

۲- بلور تجزیه کننده: بلور فلورید سدیم (NiF) بیش‌ترین کاربرد را در دستگاه‌های XRF دارد. امروزه در دستگاه‌های XRF، برای پرهیز از جابجایی پیوسته بلورهای تجزیه کننده، آن‌ها را بر روی یک منشور چندوجهی سوار می‌کنند و بدین ترتیب با چرخاندن منشور، بلور مورد نظر به راحتی در برابر پرتو X قرار می‌گیرد [۱۲].

۳- آشکارسازها: در دستگاه XRF از آشکارسازهای گازی و تهییجی استفاده می‌شود [۱۲].

فلوئورسانس اشعه ایکس در محدوده وسیعی از کاربردها به شرح زیر استفاده می‌شود:

- مطالعه سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی
- معدن کاری (اندازه‌گیری عیار مواد معدنی)
- تولید سیمان
- کارخانه‌های شیشه و سرامیک
- متالورژی (کنترل کیفی)
- مطالعات زیست‌محیطی
- صنعت نفت (درصد گوگرد در نفت خام و تولید مواد نفتی)
- تجزیه کانی‌ها، برای مطالعات زمین‌شناسی (با استفاده از طیف‌سنج XRF دستی و قابل حمل)

۳- فیلتر کالمن

فیلتر در کلمه به معنای حصول اطلاعات ثانویه با استفاده از اطلاعات موجود اولیه است. فیلتر کالمن که در سال ۱۹۶۰ توسط کالمن برای سیستم‌های خطی پیشنهاد شد، فیلتری بازگشتی است که از نظر کمینه سازی متوسط مربعات خطا بهینه است. در این فیلتر سعی شده است که از روی اندازه‌گیری‌های انجام پذیرفته، تخمین درستی از حالات سیستم به دست آید [۱۴][۱۳]. به منظور به دست آوردن روابط بازگشتی فیلتر کالمن با معادلات حالت و اندازه‌گیری،

$$\theta = [F^T(N), F(N)]^{-1} \cdot F^T(N)Y(N) \quad (17)$$

که در آن ماتریس θ مبین ضرایب مدل AR بوده و نیز ماتریس های $Y(N)$ و $F(N)$ به صورت زیر به دست می آیند:

$$Y(N) = [y(n) \ y(n+1) \ \dots \ y(N)]^T \quad (18)$$

$$F(N) = [f^T(n) \ f^T(n+1) \ \dots \ f^T(N)]^T \quad (19)$$

که در آن ماتریس $f^T(N)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$f^T(n) = [y(n-1) \ y(n-2) \ \dots \ y(n-p)] \quad (20)$$

لازم به ذکر است که با تعیین ماتریس ضرایب می توان مقدار تابع $y(n)$ را در لحظه n به صورت زیر محاسبه نمود:

$$y(n) = - \sum_{i=1}^{p} a_{p-i+1}(n) \cdot y(n-i) \quad (21)$$

به منظور ایجاد فضای حالت از معادلات تفاضلی خود بازگشتی به ترتیب زیر استفاده می شود [15]:

$$\begin{aligned} x_1(n) &= y(n-p) \\ x_2(n) &= x_1(n+1) = y(n-p+1) \\ x_3(n) &= x_2(n+1) = y(n-p+2) \\ &\vdots \\ x_{p+1}(n) &= x_p(n+1) = y(n) \end{aligned} \quad (22)$$

و یا:

$$(23)$$

$$x_1(n+1) = x_2(n)$$

$$x_2(n+1) = x_3(n)$$

$\vdots$

$$x_p(n+1) = -a_p x_p(n) - a_{p-1} x_{p-1}(n) - \dots - a_1 x_1(n)$$

معادله های رابطه (23) را می توان به شکل ماتریسی به صورت

زیر نوشت:

$$(24)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_p \end{bmatrix}_{n+1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & \dots & -a_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_p \end{bmatrix}_n$$

که از آن ماتریس انتقال Φ_n به صورت زیر حاصل می شود:

$$K_k = PO_k \cdot H_k^T \cdot (H_k \cdot PO_k \cdot H_k^T + R_k)^{-1} \quad (11)$$

که در آن PO_k مبین ماتریس هم پراش خطای متناظر با تخمین بهینه اولیه بردار حالت سیستم بوده و برای ما شناخته شده است [15].

گام ۳) تخمین به هنگام شده با بردار اندازه گیری Z_k : تخمین به هنگام شده با بردار اندازه گیری Z_k به صورت زیر انجام می شود:

$$\hat{X}_k^+ = \hat{X}_k^- + K_k \cdot (Z_k - H \cdot \hat{X}_k^-) \quad (12)$$

گام ۴) محاسبه ماتریس هم پراش خطا برای به هنگام سازی تخمین: ماتریس هم پراش متناظر با تخمین بهینه به صورت زیر محاسبه می گردد [15]:

$$P_k = (I - K_k \cdot H_k) \cdot PO_k \quad (13)$$

گام ۵) یک قدم انتشار به جلو: در نهایت تخمین بهینه حالت و ماتریس هم پراش برای پله بعدی زمان به صورت زیر به دست می آیند:

$$X_{k+1}^- = \phi_k \cdot X_k^+ \quad (14)$$

$$PO_{k+1} = \phi_k \cdot P_k \cdot \phi_k^T + Q_k \quad (15)$$

ماتریس انتقال حالت Φ_k با استفاده از مدل AR متغیر با زمان به دست می آید. Auto-Regressive، یکی از مدل های مشهوری است که در فرآیندهای اتفاقی گسسته- زمان کاربرد زیادی دارد. این مدل در حوزه زمان به شکل کلی زیر توصیف می گردد [16]:

$$y(n) = - \sum_{i=1}^p \alpha_i(n) \cdot y(n-i) + e(n) \quad (16)$$

که در آن، $y(n-i)$ مبین خروجی های مدل و $e(n)$ مبین نویز سیستم در زمان n است. ضرایب α_i نیز مجموعه ای از پارامترهایی هستند که مدل AR را تعریف می کنند و همواره $\alpha_0 = 1$ فرض می گردد. برای شناسایی سیستم ابتدا باید ضرایب α_i را به گونه ای محاسبه کرد که جمع مربعات خطا حداقل گردد. به همین جهت به این روش «حدافل مربعات» گویند [16].

در صورتی که روش مذکور روی مدل AR اعمال گردد، ماتریس ضرایب به صورت زیر حاصل می شود [16]:

موقعیت هدف در زمان حال (فیلتر کردن) و در آینده (پیش‌بینی) و یا در گذشته (هموارسازی) ارائه می‌دهد.

۴- روش تحقیق

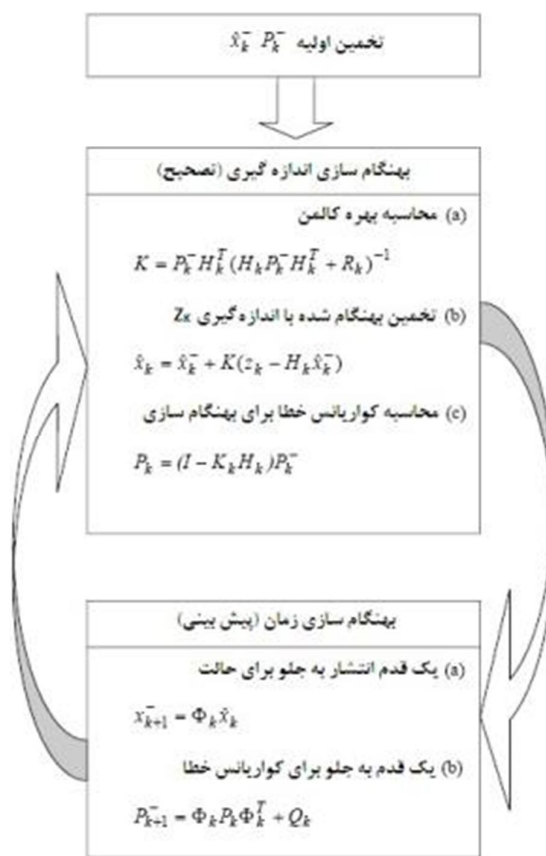
به منظور جمع‌آوری داده‌های واقعی برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، تعداد ۸۰ نمونه از جریان خوراک ورودی به واحد پرعیارکنی اولیه مدار فلوتاسیون و ۸۰ نمونه از کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون (ستون فلوتاسیون) مجتمع مس سرچشمه، به فواصل زمانی مساوی در دو نوبت ۸ ساعته، تهیه شد. همزمان، از واحد X-Ray کارخانه، عیار عناصر مس و مولیبدن نمونه‌ها اخذ گردید. شمای کلی سیستم تجزیه گر فلوتورسانس اشعه ایکس مجتمع مس سرچشمه در شکل ۵ نشان داده شده است. سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه مورد تجزیه قرار گرفت و عیار عناصر مذکور به صورت کمی تعیین شد. مقایسه عیارسنجی تجزیه گر پیوسته و آزمایشگاه برای عناصر مس و مولیبدن در جریان‌های ذکر شده، در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند.



شکل ۵: سیستم تجزیه گر مجتمع مس سرچشمه.

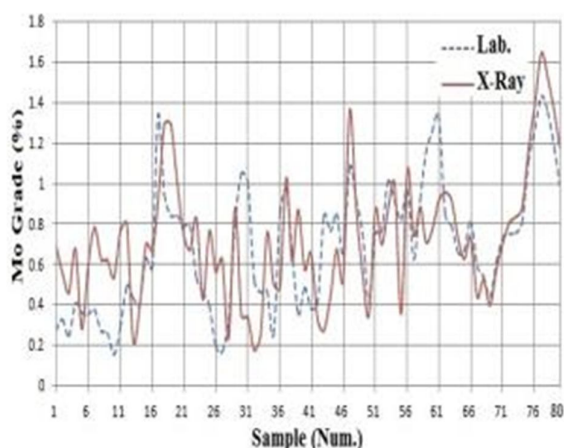
$$\phi_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & \cdots & -a_p \end{bmatrix} \quad (25)$$

شکل ۴ فرآیند رایانه‌ای این فیلتر را نشان می‌دهد. فیلتر کالمن در طیف گسترده‌ای از کاربردهای مهندسی از رادار گرفته تا تحلیل تصویر کاربرد دارد.



شکل ۴: الگوریتم فیلترینگ کالمن [۱۵].

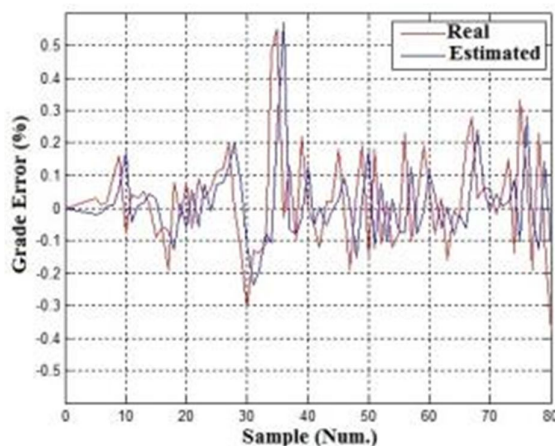
روش فیلتر کالمن یکی از عناوین مهم در نظریه کنترل و مهندسی سیستم‌های کنترلی است. به عنوان مثال، برای کاربرد آن در رادار، به منظور ردیابی هدف، اطلاعات در مورد موقعیت، سرعت و شتاب هدف با حجم عظیمی از انحراف به دلیل نویزها، در هر لحظه اندازه‌گیری می‌شود. فیلتر کالمن از پویایی هدف بهره می‌گیرد. به این صورت که سیر تکاملی آن را کنترل می‌کند تا تأثیرات نویز را از بین ببرد و یک برآورد خوب از



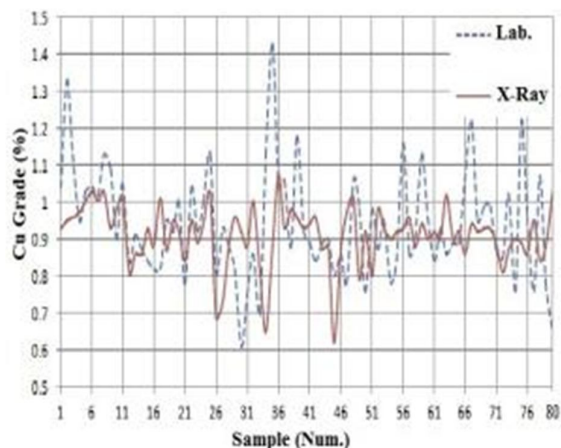
شکل ۹: مقایسه میزان عیار مولیبدن اندازه گیری شده توسط تجزیه گر پیوسته و آزمایشگاه در کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون.

۵- نتایج

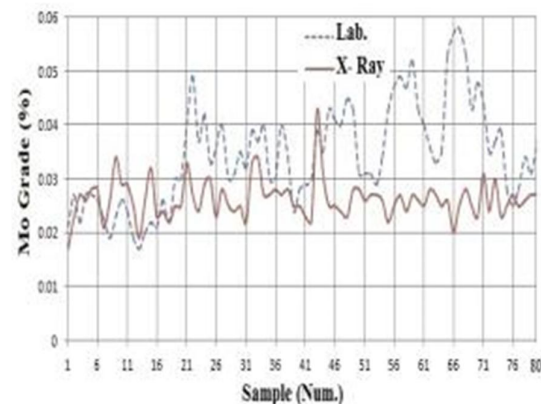
پیش بینی مقدار خطای دستگاه تجزیه گر پیوسته با استفاده از روش فیلتر کالمن درجه دو، با نرم افزار MATLAB تخمین زده شد. نتایج در شکل ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ و جداول ۱ و ۲ آمده است.



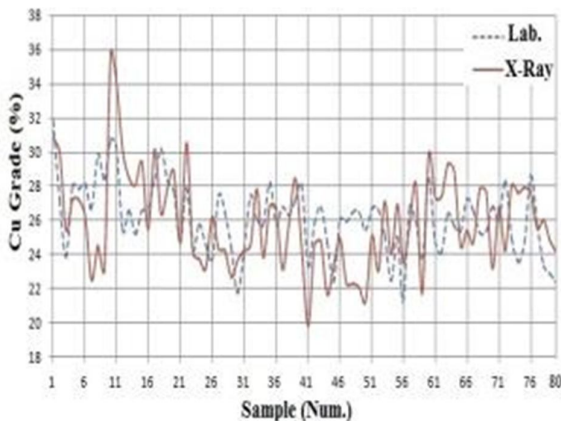
شکل ۱۰: نتایج پیش بینی میزان خطاهای عیارسنجی مس در خوراک ورودی به مدار فلوتاسیون.



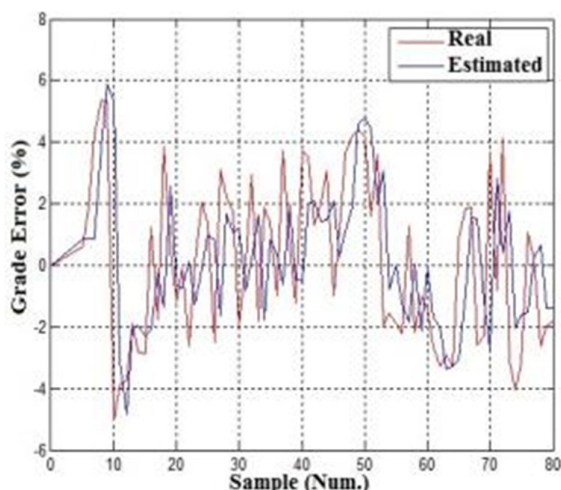
شکل ۶: مقایسه میزان عیار مس اندازه گیری شده توسط تجزیه گر پیوسته و آزمایشگاه در خوراک ورودی مدار فلوتاسیون.



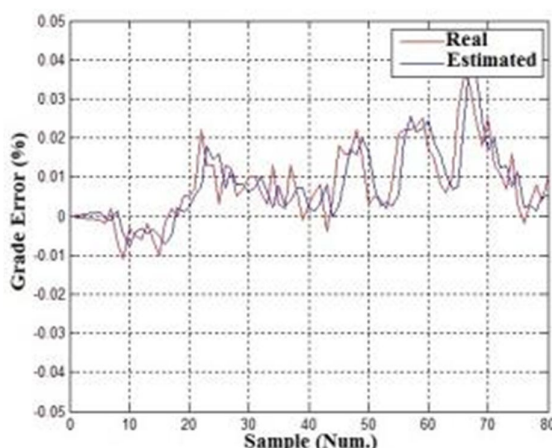
شکل ۷: مقایسه میزان عیار مولیبدن اندازه گیری شده توسط تجزیه گر پیوسته و آزمایشگاه در خوراک ورودی مدار فلوتاسیون.



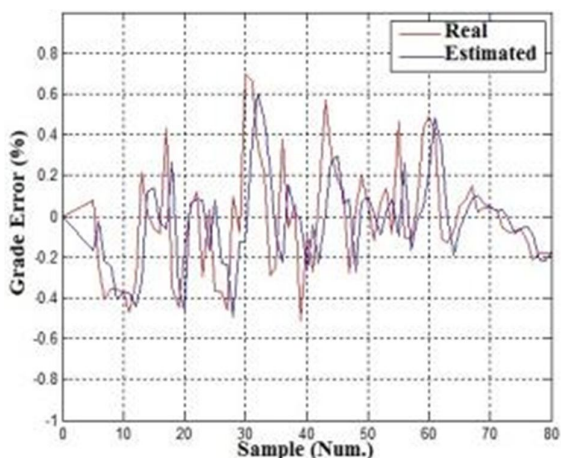
شکل ۸: مقایسه میزان عیار مس اندازه گیری شده توسط تجزیه گر پیوسته و آزمایشگاه در کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون.



شکل ۱۲: نتایج پیش‌بینی میزان خطاهای عیارسنجی مس در کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون.



شکل ۱۱: نتایج پیش‌بینی میزان خطاهای عیارسنجی مولیبدن در خوراک ورودی به مدار فلوتاسیون.



شکل ۱۳: نتایج پیش‌بینی میزان خطاهای عیارسنجی مولیبدن در کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون.

جدول ۱: مقادیر حداکثر، حداقل، متوسط و موثر خطا در پیش‌بینی خطاهای عیار مس و مولیبدن در خوراک ورودی برای ۸۰ آزمون با استفاده از فیلتر کالمن.

عوامل	میزان خطای تخمین عیار مس	میزان خطای تخمین عیار مولیبدن
حداکثر	۰/۵۸۶۲	۰/۰۱۹۶
حداقل	-۰/۵۹۹۴	-۰/۰۱۳۵
متوسط	۰/۰۱۰۷	۰/۰۰۰۲۵۰۲
موثر	۰/۱۸۹	۰/۰۰۶۷

در جدول ۱ مقدار موثر خطا در پیش‌بینی خطاهای عیار در خوراک ورودی مدار فلوتاسیون با استفاده از فیلتر کالمن آمده است که برای مس کمتر از ۰/۱۹ و برای مولیبدن کمتر از ۰/۰۰۶۷ است. شکل‌های ۹ و ۱۰ مقادیر واقعی و نیز پیش‌بینی‌شده خطاهای عیارسنجی را برای ۸۰ داده آزمون نشان می‌دهند.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مقادیر واقعی و نیز پیش‌بینی‌شده خطاهای عیارسنجی برای ۸۰ داده آزمون آمده است. از جدول ۲ مشاهده می‌شود که مقدار موثر خطا در پیش‌بینی خطاهای عیار مس و مولیبدن در کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون با استفاده از فیلتر کالمن، به ترتیب، برای مس و مولیبدن کمتر از ۲/۴۸۴ و ۰/۲۷۴۱ است.

جدول ۲: مقادیر حداکثر، حداقل، متوسط و موثر خطا در پیش‌بینی خطاهای عیار مس و مولیبدن کنسانتره نهایی برای ۸۰ آزمون با استفاده از فیلتر کالمن.

عوامل	میزان خطای تخمین عیار مس	میزان خطای تخمین عیار مولیبدن
حداکثر	۵/۴۸۱۲	۰/۸۲۶۴
حداقل	-۷/۳۲۶۱	-۰/۶۱۴۸
متوسط	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۹۲
موثر	۲/۴۸۴۹	۰/۲۷۴۱

با استفاده از روش پیشنهادی می‌توان خطای اندازه‌گیری تجزیه گر پیوسته را به میزان مناسبی کاهش داد. بدین منظور ۶ نمونه از خوراک اولیه و کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون

نظری، بلکه به عنوان یک نیاز ضروری کاربردی، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این مقاله، روشی مبتنی بر فیلتر کالمن با استفاده از داده های واقعی در مقیاس صنعتی به منظور پیش بینی و تصحیح خطای تجزیه گر پیوسته فلورسانس اشعه ایکس مجتمع مس سرچشمه ارائه شد. بر اساس نتایج، مقدار موثر خطای پیش بینی عیار مس و مولیبدن در خوراک ورودی به واحد پرعیارکنی اولیه، به ترتیب، کمتر از ۰/۱۹ و ۰/۰۰۶۷ و در کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون، کمتر از ۰/۴۸۴ و ۰/۲۷۴ حاصل شد. همچنین، با تصحیح خطاهای پیش بینی، می توان مقدار موثر خطاهای عیارسنجی در تجزیه گرهای پیوسته را کاهش داده و در نتیجه دستورالعمل های کنترلی بهتری را اتخاذ نمود. با استفاده از روش پیشنهادی، می توان مقادیر خطای تجزیه گر پیوسته را در بین فواصل زمانی اندازه گیری نمونه ها با دقت مناسبی پیش بینی کرد.

۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت ملی صنایع مس ایران، به ویژه مرکز تحقیق و توسعه صنایع مس که در انجام تحقیق حاضر همکاری بی شائبه داشته اند، تشکر و قدردانی می نمایند.

۸- مراجع

- Braden T. F., Kongas M. and Saloheimo K., 2002, "On-line Composition Analysis of Mineral Slurries", Mineral Processing, pp.2020-2047.
- Wills B., 2006, "Mineral Processing Technology", 7 Edition, Pergamon Press.
- Laurila H., Karesvuori J. and Tiili O., 2002, "Strategies for Instrumentation and Control of Flotation Circuits", Mineral Processing Plant Design, Practice and Control, Vol.2, pp.2174-2195.
- Remes A., Saloheimo K. and Jounela S. L. J., 2007, "Effect of Speed and Accuracy of On-line Elemental Analysis on Flotation Control Performance", Minerals Engineering, pp.1-12.
- Bouchard J., Desbiens A., Villar R. D. and Nunez E., 2009, "Column Flotation Simulation and Control", Minerals Engineering, pp.519-529.
- Mendez D. A., Gálvez E. D. and Cisternas L. A., 2009, "State of the Art in the Conceptual Design of Flotation Circuits", Mineral. Processing, pp.1-15.
- Bergh L. G. and Yianatos J. B., 2003, "Flotation Column Automation: State of the Art", Control Engineering Practice, pp.67-72.
- Leroux D. and Franklin M., 1994, "A Methodology for On-Stream XRF Analyzer Calibration using Statistics", Mineral Processing, Ottawa, pp.461-474.

انتخاب گردید. سپس مقادیر خطای واقعی و پیش بینی شده عیار مس و مولیبدن مقایسه شدند. نتایج حاصله در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳: مقایسه میزان خطای عیارسنجی مس و مولیبدن برای ۶ نمونه از خوراک ورودی به مدار فلوتاسیون، قبل و پس از پیش بینی توسط روش فیلتر کالمن

شماره نمونه	میزان خطای عیارسنجی مس قبل از پیش بینی	میزان خطای عیارسنجی مس پس از پیش بینی	میزان خطای عیارسنجی مولیبدن قبل از پیش بینی	میزان خطای عیارسنجی مولیبدن پس از پیش بینی
۸	۰/۱	۰/۱۰۵	-۰/۰۰۷	-۰/۰۰۱۲
۲۷	۰/۲	۰/۱۲۷۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۰۷
۳۵	۰/۵۵	۰/۲۱۱۷	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۱۶
۴۴	-۰/۰۲	-۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۰۸
۵۵	-۰/۰۸	-۰/۰۴۱۳	۰/۰۲۱	۰/۰۰۴۳
۷۴	-۰/۱۴	۰/۰۸۶۲	۰/۰۱۶۰	۰/۰۰۷۲

جدول ۴: مقایسه میزان خطای عیارسنجی مس و مولیبدن برای ۶ نمونه از کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون، قبل و پس از پیش بینی توسط روش فیلتر کالمن.

شماره نمونه	میزان خطای عیارسنجی مس قبل از پیش بینی	میزان خطای عیارسنجی مس پس از پیش بینی	میزان خطای عیارسنجی مولیبدن قبل از پیش بینی	میزان خطای عیارسنجی مولیبدن پس از پیش بینی
۸	۵/۳۴	۳/۵۲۳	-۰/۳۵۳	-۰/۲۴
۲۷	۳/۰۹	-۱/۵۴۴۸	-۰/۴۶	-۰/۱۳۶
۳۵	۱/۳۹	۰/۸۲۴۰	۰/۴۳۲	-۰/۰۵۹۴
۴۴	۳/۰۵	۱/۴۵۶۲	۰/۳۲۱	۰/۲۱۱۵
۵۵	-۱/۸۸	-۰/۰۱۲۲	-۰/۴۶۵	-۰/۰۹۵
۷۴	-۴/۰۴	-۲/۰۴۸۱	-۰/۰۸۱	-۰/۰۲۰۷

نتایج حاصل از آزمون داده های واقعی نشان می دهند که روش فیلتر کالمن در پیش بینی و تصحیح خطاهای اندازه گیری تجزیه گر پیوسته، دسترسی به عیارسنجی دقیق تر را تضمین می کند.

۶- نتیجه گیری

علی رغم گسترش روزافزون استفاده از روش های تجزیه گر عنصری پیوسته مانند فلورسانس اشعه ایکس و نقش مهم آن ها در زمینه های مختلف کنترلی و اقتصادی، موضوع پیش بینی خطا و بهبود دقت اندازه گیری، نه تنها از دیدگاه

- Flintoff B. C., 1992, "Measurement Issues in Quality Control", In Proceedings of the Toronto CMP Branch Meeting, Toronto, pp.2-6.
- Cooper H. R., "On-Stream X-ray Analysis in Flotation", AIME, New York, pp.865-868, 1976.
- Jenkins R., 1988, "X-Ray Fluorescence Spectrometry", Wiley.
- Beckhoff B., Kanngießer B., Langhoff N., Wedell R. and Wolff H., 2006, "Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis", Springer.
- Farrokhi H., Mosavi M. R., and Nakhaei A., 2009, "Prediction of DGPS Corrections using Kalman Filter", The 30th Asian Conference on Remote Sensing, China.
- Simon D., 2006, "Optimal State Estimation Kalman, and Nonlinear Approaches", John Wiley.
- Mosavi M. R., 2006, "Comparing DGPS Corrections Prediction using Neural Network, Fuzzy Neural Network, and Kalman Filter", Journal of GPS Solution, Vol.10, No.2, pp.97-103.
- Mosavi M. R., Mohammadi K. and Refan M. H., 2002, "Time Variance ARMA Processing on GPS Data to Improve Positioning Accuracy", The Asian GPS Conference, pp.125-128.