

# شبیه‌سازی حذف خطاهای تصادفی از داده‌های فرایندهای شیمیایی به روش پالایش تطبیقی

بهنام بلوچی\*، سعید شکری، مهدی احمدی مروست، محمد ایازی

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده مهندسی توسعه، واحد مدلسازی و کنترل فرایند

پیام نگار: baloochyb@ripi.ir

## چکیده

در فرایندهای شیمیایی، ممکن است هزاران متغیر وجود داشته باشند که اندازه‌گیری آنها همواره دارای خطاهایی می‌باشد. در این مقاله یک روش برای پالایش دینامیک و خطی داده‌های فرایندی معرفی و ارزیابی می‌شود. در این روش، ابتدا یک مدل پارامتری، خطی و با ساختار ثابت در نظر گرفته شده، سپس با استفاده از داده‌های ورودی و خروجی دارای خطای فرایند، پارامترهای مدل سیستم توسط یک تخمین زنده بازگشتی محاسبه می‌شود. برای تخمین پارامترهای مدل به صورت بهنگام از روش حداقل مربعات خطا استفاده شده است. با استفاده از این پارامترها، داده‌های بدون خطای فرایند به روش صافی کالمن تولید می‌شود. برای ارزیابی روش پالایش تطبیقی داده‌ها، از داده‌های تولید شده توسط شبیه ساز فرایند Tennessee-Eastman استفاده شده است. نتیجه مقایسه خروجی‌های اصلی فرایند و خروجی‌های پالایش شده نشان می‌دهد که نتایج پالایش داده‌ها با این روش پیشنهادی به شکل مطلوبی قابل قبول است.

کلمات کلیدی: پالایش داده‌ها، تطبیقی، فرایندهای شیمیایی، صافی کالمن، Tennessee-Eastman

## ۱- مقدمه

خطاهای غیرتصادفی یا سیستماتیک در نتیجه پدیده‌های غیر تصادفی و معمولاً دایمی مانند پوسیدگی و رسوب در حسگرها یا عدم درجه‌بندی صحیح ابزار دقیق، رخ می‌دهند. این نوع خطاها در تعداد کمتری از متغیرهای اندازه‌گیری شونده مشاهده می‌شوند ولی معمولاً مقدارشان بزرگ است. مسأله تخمین متغیرها در فرایندهای شیمیایی توسط مؤلفان بسیار مورد بررسی قرار گرفته است [۶-۲]. موضوع اساسی در اینجا این است که آیا تخمین متغیرهای مشاهده‌پذیر را می‌توان با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری بهبود بخشید. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در حوزه پالایش داده‌ها انجام گرفته است [۱۲-۷]. پالایش داده‌ها<sup>۳</sup> یک روش بهینه‌سازی است که برای حذف خطاهای تصادفی از متغیرهای اندازه‌گیری شونده به کار می‌رود. همچنین از

برای دستیابی به اهداف هر طرحی در سیستم‌های فرایندی، اندازه‌گیری‌های دقیق و قابل اعتماد، ضروری است ولی خطاهایی مانع تحقق این موضوع می‌شوند [۱]. این خطاها معمولاً به دو صورت ظاهر می‌شوند: (۱) خطاهای تصادفی<sup>۱</sup> (۲) خطاهای غیر تصادفی<sup>۲</sup>.

خطاهای تصادفی حاصل از اغتشاشات و نوسانات مربوط به پدیده‌های تصادفی، مانند تغییر در شرایط محیطی می‌باشند. این خطاها مستقل از فرایند هستند و توزیع آنها به نحوی است که متوسط مقادیرشان صفر می‌شود. این نوع خطاها در اغلب متغیرهای اندازه‌گیری شونده وجود دارند ولی مقدارشان کوچک است.

1. Random Errors
2. Gross Errors

3. Data Reconciliation

X بردار متغیرهای اندازه‌گیری شده و Y بردار مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر با متغیرهای اندازه‌گیری شونده بردار X می‌باشد [۱۳].

### ۳- پالایش تطبیقی داده‌ها

پالایش تطبیقی داده‌ها دارای دو بخش عمده است. بخش اول آن، وظیفه تشخیص بهنگام<sup>۴</sup> پارامترهای مدل تطبیقی را بر عهده دارد و بخش دوم با استفاده از این مدل، تخمینی از متغیرهای بدون خطا ارائه می‌دهد.

### ۳-۱ مشخصات مدل تطبیقی

مدلی که در دو بخش پالایش داده‌ها به کار می‌رود باید تا حد ممکن عمومی باشد تا بتواند تمام فرایندهای ممکن را پشتیبانی کند. مدل در نظر گرفته شده در اینجا دارای این شرایط است:

(۱) مدل جعبه سیاه<sup>۵</sup>

(۲) دینامیک<sup>۶</sup>

(۳) خطی<sup>۷</sup>

(۴) ناپیوسته<sup>۸</sup>

(۵) بر مبنای فضای حالت<sup>۹</sup>

(۶) دارای چندین ورودی و چندین خروجی<sup>۱۰</sup>

معادلات مدل به صورت‌های زیر می‌باشند:

$$X(k) = AX(k-1) + BU(k-1) \quad (3)$$

$$Y(k) = IX(k) \quad (4)$$

$$A = [a_{ij}] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$B = [b_{ij}] \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$X^T(k) = [x_1(k) \dots x_n(k)] \quad (7)$$

$$U^T(k) = [u_1(k) \dots u_m(k)] \quad (8)$$

$$Y^T(k) = [y_1(k) \dots y_n(k)] \quad (9)$$

4. Online Identification

5. Black Box

6. Dynamic

7. Linear

8. Discrete

9. State Space

10. Multiple Inputs Multiple Outputs (MIMO)

این روش می‌توان برای تخمین متغیرهای اندازه‌گیری نشده و پارامترهای مدل نیز استفاده کرد. قبل از اعمال پالایش داده‌ها لازم است خطاهای غیر تصادفی از متغیرهای اندازه‌گیری شده حذف شوند [۲].

در پالایش داده‌ها، معادلات مدل، قیود بهینه‌سازی می‌باشند. براساس نوع معادلات این قیود می‌توان مسئله پالایش داده‌ها را به دو صورت طبقه‌بندی کرد. براساس اینکه معادلات مدل خطی یا ناخطی باشند، روش‌های پالایش داده‌ها به دو دسته خطی و ناخطی طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین براساس اینکه متغیر زمان در معادلات مدل وارد شود یا وارد نشود، روش‌های پالایش داده‌ها به دو دسته دینامیک و پایا<sup>۱</sup> طبقه‌بندی می‌شوند [۱۳].

پالایش تطبیقی داده‌ها<sup>۲</sup> یک روش خطی و دینامیک بر مبنای طبقه‌بندی بالا می‌باشد. امتیاز این روش بر روش‌های دیگر پالایش خطی و دینامیک داده‌ها، عدم نیاز آن به یک مدل از فرایند است. این روش، مدل مورد نیاز را خودش تخمین می‌زند. به این ترتیب برخلاف دیگر روشها، این روش مستقل از فرایند است و می‌توان آن را روی هر فرایندی اعمال نمود. تنها چیزی که این روش به آن نیاز دارد مقادیر متغیرهای ورودی و خروجی آلوده به خطای فرایند است.

### ۲- فرمول‌بندی مسئله پالایش داده‌ها

روش‌های پالایش داده‌ها برای بهبود صحت<sup>۳</sup> در اندازه‌گیری متغیرها به کار می‌رود. منظور از صحت یک متغیر، قدر مطلق اختلاف بین مقدار حقیقی متغیر و مقدار اندازه‌گیری شده آن است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، پالایش داده‌ها یک روش بهینه‌سازی است که معادلات تابع هدف و قیود آن به شکل زیر می‌باشند [۱۳].

تابع هدف:

$$\text{Min}(Y - X)^T \Sigma^{-1} (Y - X) \quad (1)$$

قیود:

$$F(X, t) = 0 \quad (2)$$

بهینه‌سازی با استفاده از متغیرهای X انجام می‌شود. در معادلات بالا F تابع برداری قیود، t متغیر زمان،  $\Sigma$  ماتریس واریانس- کوواریانس،

1. Steady State

2. Adaptive Data Reconciliation

3. Accuracy

سپس با استفاده از این مقادیر بدون خطا و معادله (۴)، متغیرهای خروجی پالایش شده و بدون خطا به دست می‌آید [۱۵]. معادلات صافی کالمن به صورت‌های زیر می‌باشند:

$$N(k) = AM(k-1)A^T + Q \quad (15)$$

$$M(k) = N(k) - N(k)[R + N(k)]^{-1}N(k) \quad (16)$$

$$K_e(k) = N(k)[R + N(k)]^{-1} \quad (17)$$

$$Z(k) = AX(k-1) + BU(k-1) \quad (18)$$

$$X(k) = Z(k) + K_e(k)[Y(k) - Z(k)] \quad (19)$$

#### ۴- پیاده‌سازی پالایش تطبیقی داده‌ها

هر کدام از بخش‌هایی که برای پالایش تطبیقی داده‌ها شرح داده شد در بلوک‌های جداگانه‌ای در محیط Simulink پیاده‌سازی شده است.

داده‌های ورودی و خروجی فرایند با فرمتی مناسب به محیط کاری نرم‌افزار Matlab و سپس از آنجا به جعبه ابزار Simulink وارد می‌شوند. سپس داده‌ها به طور مصنوعی آلوده به خطای تصادفی می‌شوند. این داده‌های آلوده سپس وارد بلوک تشخیص پارامترها و نهایتاً وارد بلوک صافی کالمن می‌شوند. خروجی بلوک صافی کالمن، داده‌های بدون خطاست. در شکل (۱) نحوه ارتباط این بلوک‌ها در محیط جعبه ابزار Simulink نشان داده شده است.

#### ۵- نتایج

برای ارزیابی توان روش پیشنهادی در حذف خطاهای تصادفی، از داده‌های ورودی و خروجی حاصل از شبیه‌سازی فرایند Tennessee-Eastman استفاده شده است. این فرایند یک مسأله استاندارد جهت ارزیابی روش‌های پیشنهادی در زمینه بهینه‌سازی و کنترل فرایندها می‌باشد. جزئیات این فرایند در مقالات گوناگونی آورده شده است [۱۶ و ۱۷].

در معادلات بالا X بردار n بعدی متغیرهای حالت، Y بردار n بعدی متغیرهای خروجی، U بردار m بعدی متغیرهای ورودی، k زمان نمونه‌گیری، I ماتریس یکه مربعی با ابعاد n و همچنین A و B ماتریس‌های حاوی پارامترهای مدل با ابعاد مناسب می‌باشند.

#### ۳-۲ تشخیص بهنگام پارامترهای مدل

برای تشخیص پارامترهای مدل روش‌های مختلفی وجود دارد. در اینجا از روش بازگشتی حداقل مربعات خطا<sup>۱</sup> استفاده شده است. این روش دارای سرعت همگرایی مناسبی است و نیز در شرایط مختلف، پایداری خود را حفظ می‌کند. در این روش با استفاده از مقادیر متغیرهای ورودی و خروجی به فرایند در زمان نمونه‌گیری قبلی، تخمینی از پارامترهای مدل متناظر با آن فرایند در زمان نمونه‌گیری فعلی ارائه می‌شود. به عبارت دیگر ماتریس‌های A و B را تعیین می‌کند [۱۴]. الگوریتم تشخیص پارامترهای مدل به شکل زیر است:

$$\theta^T_i = [a_{i1} \dots a_{in} \ b_{i1} \dots b_{im}] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n] \quad (11)$$

$$\varphi^T(k) = [-y_1(k-1) \ \dots \ -y_n(k-1) \ u_1(k-1) \ \dots \ u_m(k-1)] \quad (12)$$

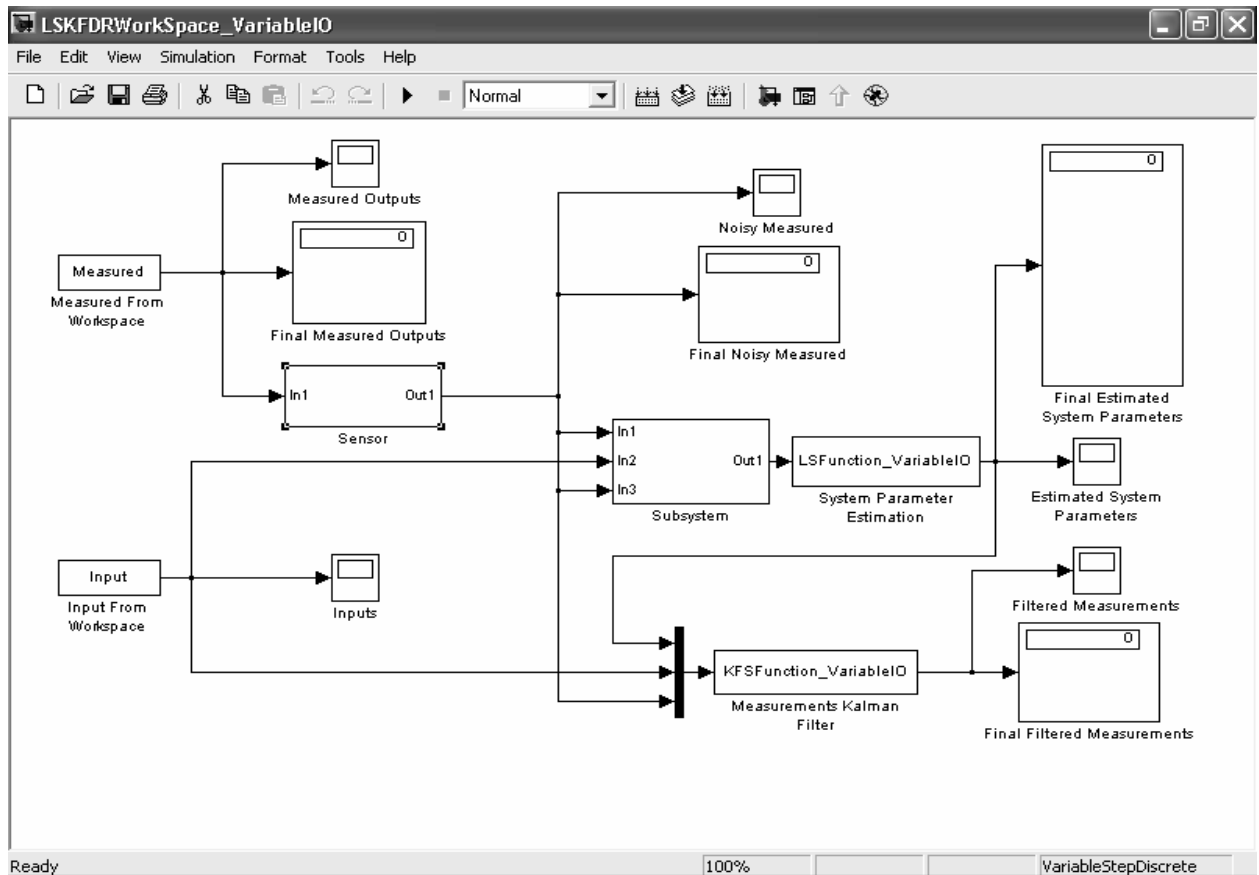
$$\theta(k) = \theta(k-1) + P(k-1) \varphi(k)[Y(k) - \theta^T(k-1) \varphi(k)]^T / [\alpha + \varphi^T(k)P(k-1) \varphi(k)] \quad (13)$$

$$P(k) = P(k-1) - P(k-1) \varphi(k) \varphi^T(k)P(k-1) / [\alpha + \varphi^T(k)P(k-1) \varphi(k)] \quad (14)$$

#### ۳-۳ تخمین متغیرهای حالت و متغیرهای خروجی

برای تخمین متغیرهای حالت<sup>۲</sup> از روش صافی کالمن<sup>۳</sup> استفاده شده است. صافی کالمن، با استفاده از پارامترهای تشخیص داده شده مدل تطبیقی و مقادیر دارای خطای متغیرهای ورودی و خروجی فرایند و نیز با استفاده از ماتریس (واریانس - کوواریانس) به عنوان پارامتر (که معیاری از میزان و توزیع خطای تصادفی در متغیرهای فرایندی است) تخمینی از متغیرهای حالت بدون خطا ارائه می‌دهد.

1. Recursive Least Square Identifier
2. State Estimation
3. Kalman Filter



شکل ۱- نحوه ارتباط بلوکها

به صورت بهنگام است و در زمان حقیقی<sup>۱</sup> انجام نمی‌شود، واحد زمان می‌تواند ثانیه، دقیقه و یا هر واحد دیگر سنجش زمان باشد. بلوک مربوط به تشخیص پارامترهای مدل، دارای دو پارامتر است. یکی تعداد متغیرهای خروجی فرایند و دیگری تعداد متغیرهای ورودی فرایند. بلوک مربوط به تخمین متغیرهای حالت علاوه بر پارامترهای بالا دارای دو پارامتر دیگر شامل ماتریس (واریانس - کوواریانس) خطای مدلسازی و خطای اندازه‌گیری‌هاست. مقادیر آنها براساس میزان خطای موجود در متغیرهای اندازه‌گیری شده، تعیین می‌شود. مقادیر این دو پارامتر به شکل زیر می‌باشند. خطای مدلسازی: برداری با طول ۵۱ المان و مقدار ۳/۰۵ برای هر کدام از المان‌های آن. خطای اندازه‌گیری: برداری با طول ۵۱ المان و مقدار ۱۰ برای هر کدام از المان‌های آن.

برای استخراج داده‌های ورودی و خروجی حاصل از شبه‌سازی این فرایند از یک برنامه شبه‌ساز تحت Matlab استفاده شده است. پرونده شبه‌ساز مورد نظر در سایت دانشگاه واشنگتون موجود است [۱۸]. برنامه شبه‌ساز فرایند Tennessee-Eastman دارای ۱۲ ورودی و ۵۱ خروجی می‌باشد. از ۵۱ متغیر خروجی، ۴۱ متغیر اول آن متغیرهای فرایندی هستند.

پس از وارد شدن این داده‌های ورودی و خروجی از این شبه‌ساز به سیستم پالایش تطبیقی داده‌ها (شکل (۱))، یک سیگنال خطای مصنوعی (White Noise) با توان ۱۰۰۰ به داده‌های خروجی که نماینده متغیرهای اندازه‌گیری هستند، وارد می‌شود. داده‌های ورودی نماینده متغیرهای اعمال کنترل می‌باشند. فرض بر این است که این داده‌های ورودی، معین و بدون خطا به فرایند اعمال می‌شوند.

شبه‌سازی پالایش داده‌ها به صورت ناپیوسته با زمان نمونه‌گیری ۱ واحد و به مدت ۱۰ واحد زمانی انجام می‌گیرد. چون شبه‌سازی

1. Real Time

## ۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شده است که روشی برای پالایش دینامیک و خطی داده‌ها ارائه شود و سپس این روش مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به اینکه هیچکدام از روشهای پالایش داده‌ها، خطاهای تصادفی را به‌طور کامل و ایده‌آل حذف نمی‌کنند لذا نتیجه این ارزیابی قابل قبول است. امتیاز این روش نسبت به دیگر روش‌های پالایش داده‌ها این است که مدل در نظر گرفته شده کلی و تطبیقی می‌باشد و وابسته به فرایند در دست بررسی نیست. در این روش با استفاده از داده‌های آلوده به خطای ورودی و خروجی از فرایند، پارامترهای مدل به صورت لحظه‌ای تنظیم می‌شوند.

تنها مشکل این روش، ناتوانی آن در کار کردن با قيود نامساوی است. از آنجا که این روش تخمین مقدار پارامترهای مدل را به صورت به‌هنگام با استفاده از داده‌های ورودی و خروجی تا لحظه مورد نظر محاسبه می‌کند، غیر خطی بودن فرایند در بیشتر موارد، مشکلی برای این روش ایجاد نمی‌کند، زیرا در هر لحظه مدل خطی فرایند حول نقطه کاری همان لحظه تخمین زده می‌شود و این مدل با گذشت زمان و تغییر نقطه کاری تغییر می‌کند.

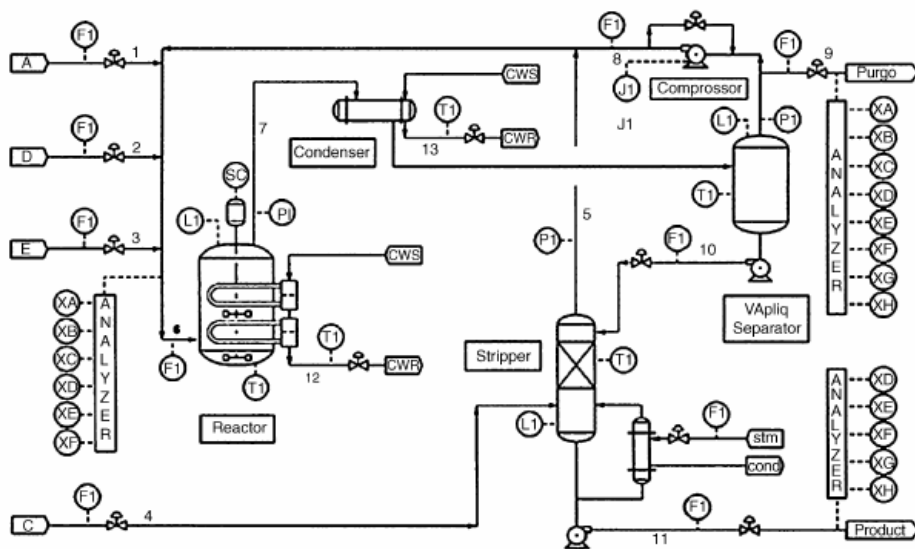
در جدول (۱) نتایج عددی در انتهای بازه زمانی برای ۴۱ متغیر فرایندی آورده شده است. ۱۰ متغیر دیگر، متغیرهای محاسباتی می‌باشند که معیار سنجش ما نیستند. برای مشاهده متغیرهای فرایندی روی نمودار، به شکل (۲) مراجعه شود. در این جدول، ستون «مقدار واقعی» مربوط به مقادیر اصلی متغیرهای فرایندی می‌باشد که شبیه ساز در اختیار ما گذاشته است. ستون «مقدار دارای خطا» همان مقادیر مربوط به ستون «مقدار واقعی» پس از اعمال یک خطای مصنوعی در محیط Simulink است. همچنین ستون «مقدار پالایش شده» دارای مقادیر پالایش شده متغیرهای دارای خطاست که مقادیر آنها در ستون «مقدار دارای خطا» فهرست شده‌اند. ستون «اختلاف» دارای قدر مطلق اختلاف مقادیر دو ستون قبلی است.

برای ارزیابی عملکرد سیستم پالایش داده‌ها، متوسط مقادیر هر دو ستون «اختلاف» در ادامه محاسبه شده است.

متوسط قدرمطلق اختلاف مقادیر دارای خطا و مقادیر حقیقی متغیرها: ۱۶/۱۶

متوسط قدرمطلق اختلاف مقادیر پالایش شده و مقادیر حقیقی متغیرها: ۹/۱۲

همانطور که مشاهده می‌شود سیستم پالایش داده‌ها بر مبنای این روش تا حد قابل قبولی خطای تصادفی اعمال شده به متغیرها را کاهش می‌دهد ولی آنها را حذف نمی‌کند.



شکل ۲- نمودار PFD مربوط به فرایند تنسی - ایستمن<sup>۱</sup>

جدول ۱- مقایسه مقادیر واقعی، دارای خطا و پالایش شده متغیرها

متغیر	واحد	مقدار واقعی	مقدار دارای خطا	اختلاف	مقدار واقعی	مقدار پالایش شده	اختلاف
خوراک A (جریان ۱)	kscmh <sup>1</sup>	۰/۲۵	۱۶/۴۱	۱۶/۱۶	۰/۲۵	۵۵/۸	۳۰/۸
خوراک D (جریان ۲)	kg/hr	۸۰/۳۶۶۰	۹۰/۳۶۷۶	۱۰/۱۶	۸۰/۳۶۶۰	۵۰/۳۶۶۵	۷۰/۴
خوراک E (جریان ۳)	kg/hr	۱۰/۴۵۱۸	۲۰/۴۵۳۴	۱۰/۱۶	۱۰/۴۵۱۸	۷۰/۴۵۱۷	۴۰/۰
خوراک A و C (جریان ۴)	kscmh	۲۸/۹	۴۴/۲۵	۱۶/۱۶	۲۸/۹	۵۸/۱۷	۳۰/۸
جریان برگشتی (جریان ۸)	kscmh	۹۳/۲۶	۱۰/۴۳	۱۶/۱۶	۹۳/۲۶	۴۳/۳۴	۴۹/۷
میزان خوراک راکتور	kscmh	۶۳/۴۲	۷۹/۵۸	۱۶/۱۶	۶۳/۴۲	۱۸/۵۰	۵۵/۷
فشار راکتور	kPa gauge	۹۰/۲۷۹۸	۱۰/۲۸۱۵	۲۰/۱۶	۹۰/۲۷۹۸	۶۰/۲۷۷۴	۳۰/۲۴
سطح مایع راکتور	%	۵۹/۸۴	۷۵/۱۰۰	۱۶/۱۶	۵۹/۸۴	۹۹/۸۷	۴۰/۳
دمای راکتور	Deg C	۳۸/۱۲۰	۵۴/۱۳۶	۱۶/۱۶	۳۸/۱۲۰	۸۸/۱۲۷	۵۰/۷
میزان جریان Purge	kscmh	۳۴/۰	۵۰/۱۶	۱۶/۱۶	۳۴/۰	۶۳/۸	۲۹/۸
دمای ظرف جداسازی محصول	Deg C	۰/۹/۸۰	۲۵/۹۶	۱۶/۱۶	۰/۹/۸۰	۸۱/۸۷	۷۳/۷
سطح مایع ظرف جداسازی محصول	%	۴۲/۲۸	۵۹/۴۴	۱۶/۱۶	۴۲/۲۸	۱۱/۴۸	۶۹/۱۹
فشار ظرف جداسازی محصول	kPa gauge	۴۰/۲۷۲۷	۶۰/۲۷۴۳	۲۰/۱۶	۴۰/۲۷۲۷	۹۰/۲۷۰۲	۵۰/۲۴
جریان پایین ظرف جداسازی محصول	m <sup>3</sup> /hr	۱۸/۲۵	۳۵/۴۱	۱۶/۱۶	۱۸/۲۵	۵۳/۳۳	۳۵/۸
سطح مایع عریان ساز	%	۵۵/۴۴	۷۱/۶۰	۱۶/۱۶	۵۵/۴۴	۸۲/۵۲	۲۷/۸
فشار عریان ساز	kPa gauge	۷۰/۳۲۰۶	۸۰/۳۲۲۲	۱۰/۱۶	۷۰/۳۲۰۶	۴۰/۳۱۷۷	۳۰/۲۹
جریان پایین عریان ساز	m <sup>3</sup> /hr	۷۷/۲۲	۹۳/۳۸	۱۶/۱۶	۷۷/۲۲	۱۵/۳۱	۳۹/۸
دمای عریان ساز	Deg C	۳۵/۶۵	۵۱/۸۱	۱۶/۱۶	۳۵/۶۵	۲۶/۷۳	۹۱/۷
میزان بخار عریان ساز	kg/h	۲۵/۲۳۳	۴۲/۲۴۹	۱۷/۱۶	۲۵/۲۳۳	۱۶/۲۴۰	۹۱/۶
کار کمپرسور	kW	۴۵/۳۳۶	۶۲/۳۵۲	۱۷/۱۶	۴۵/۳۳۶	۷۲/۳۳۴	۷۳/۱
دمای ماده خنک کننده راکتور	Deg C	۴۷/۹۴	۶۳/۱۱۰	۱۶/۱۶	۴۷/۹۴	۲۱/۱۰۲	۷۴/۷
دمای ماده خنک کننده جداساز	Deg C	۹۵/۷۷	۱۱/۹۴	۱۶/۱۶	۹۵/۷۷	۳۳/۸۴	۳۹/۶
درصد مولی ماده A به راکتور	Mole %	۹۹/۳۰	۱۶/۴۷	۱۶/۱۶	۹۹/۳۰	۰/۹/۳۸	۱۰/۷
درصد مولی ماده B به راکتور	Mole %	۴۹/۸	۶۵/۲۴	۱۶/۱۶	۴۹/۸	۶۷/۱۶	۱۸/۸
درصد مولی ماده C به راکتور	Mole %	۲۵/۲۸	۴۲/۴۴	۱۶/۱۶	۲۵/۲۸	۲۸/۳۷	۰/۲/۹
درصد مولی ماده D به راکتور	Mole %	۹۰/۶	۰/۶/۲۳	۱۶/۱۶	۹۰/۶	۱۷/۱۵	۲۷/۸
درصد مولی ماده E به راکتور	Mole %	۴۵/۱۹	۶۱/۳۵	۱۶/۱۶	۴۵/۱۹	۰/۵/۲۷	۶۰/۷
درصد مولی ماده F به راکتور	Mole %	۶۲/۱	۷۸/۱۷	۱۶/۱۶	۶۲/۱	۹۱/۹	۲۹/۸
درصد مولی ماده A در جریان Purge	Mole %	۸۴/۳۰	۰/۰/۴۷	۱۶/۱۶	۸۴/۳۰	۴۶/۳۶	۶۳/۵
درصد مولی ماده B در جریان Purge	Mole %	۲۴/۱۳	۴۱/۲۹	۱۶/۱۶	۲۴/۱۳	۴۲/۲۱	۱۸/۸
درصد مولی ماده C در جریان Purge	Mole %	۴۴/۲۶	۶۱/۴۲	۱۶/۱۶	۴۴/۲۶	۸۱/۳۶	۳۷/۱۰
درصد مولی ماده D در جریان Purge	Mole %	۲۱/۱	۳۷/۱۷	۱۶/۱۶	۲۱/۱	۹۷/۹	۷۶/۸
درصد مولی ماده E در جریان Purge	Mole %	۲۸/۱۹	۴۴/۳۵	۱۶/۱۶	۲۸/۱۹	۲۹/۲۷	۰/۱/۸
درصد مولی ماده F در جریان Purge	Mole %	۲۴/۲	۴۰/۱۸	۱۶/۱۶	۲۴/۲	۵۴/۱۰	۳۱/۸
درصد مولی ماده G در جریان Purge	Mole %	۵۹/۴	۷۶/۲۰	۱۶/۱۶	۵۹/۴	۹۲/۱۲	۳۲/۸
درصد مولی ماده H در جریان Purge	Mole %	۲۲/۲	۳۸/۱۸	۱۶/۱۶	۲۲/۲	۵۰/۱۰	۲۸/۸
درصد مولی ماده D در محصول	Mole %	۰/۲/۰	۱۹/۱۶	۱۶/۱۶	۰/۲/۰	۳۲/۸	۳۰/۸
درصد مولی ماده E در محصول	Mole %	۸۹/۰	۰/۶/۱۷	۱۶/۱۶	۸۹/۰	۱۵/۹	۲۵/۸
درصد مولی ماده F در محصول	Mole %	۰/۸/۰	۲۵/۱۶	۱۶/۱۶	۰/۸/۰	۳۸/۸	۳۰/۸
درصد مولی ماده G در محصول	Mole %	۳۹/۵۴	۵۶/۷۰	۱۶/۱۶	۳۹/۵۴	۴۹/۶۱	۱۰/۷
درصد مولی ماده H در محصول	Mole %	۴۲/۴۲	۵۸/۵۸	۱۶/۱۶	۴۲/۴۲	۷۸/۵۲	۳۶/۱۰

۱. هزار متر مکعب استاندارد در ساعت

- [1] Benqlilou C., Data Reconciliation as a Framework for Chemical Processes Optimization and Control, PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, (2004).
- [2] Romagnoli, J. A., & Stephanopoulos, G., On the rectification of measurement errors for complex chemical plants, *Chemical Engineering Science*, Vol. 35, pp. 1067–1081, (1980).
- [3] Crowe, C. M., Garca Campos, Y. A., & Heymak, A., Reconciliation of process flowrates by matrix projection. Part I. Linear case, *American Institute of Chemical Engineering Journal*, Vol. 29, pp. 881–888, (1983).
- [4] van der Heijden, R. T. J. M., Heijnen, J. J., Hellinga, C., Romein, B., & Luyben, K. Ch. A. M., Linear constraint relations in biochemical reaction systems. I. Classification of the calculability and the balanceability of conversion rates, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 43, pp. 3–10, (1994).
- [5] Van der Heijden, R. T. J. M., Romein, B., Heijnen, J. J., Hellinga, C., & Luyben, K. Ch. A. M., Linear constraint relations in biochemical reaction systems. II. Diagnosis and estimation of gross errors, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 43, pp. 11–20, (1994).
- [6] Romagnoli J.A., Sanchez M.C., *Data Processing and Reconciliation for Chemical Process Operations*, Academic Press, (2000).
- [7] Diego Martinez Prata, Marcio Schwaab, Enrique Luis Lima, José Carlos Pinto, Simultaneous robust data reconciliation and gross error detection through particle swarm optimization for an industrial polypropylene reactor, *Chemical Engineering Science*, Vol. 65, no. 17, pp. 4943-4954, 1 September, (2010).
- [8] Márcio A.F. Martins, Carolina A. Amaro, Leonardo S. Souza, Ricardo A. Kalid, Asher Kiperstok, New objective function for data reconciliation in water balance from industrial processes, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 18, no. 12, pp. 1184-1189, August, (2010).
- [9] Flavio Manenti, Stefano Signor, Maria Grazia Grottoli, Paolo Fabbri, Adaptive Data Reconciliation Coupling C++ and PRO/II and On-line Application by the Field, *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 373-378, (2010).
- [10] Qingfang Wu, Xavier Litrico, Alexandre M. Bayen, Data reconciliation of an open channel flow network using modal decomposition, *Advances in Water Resources*, Vol. 32, no. 2, pp. 193-204, February (2009).
- [11] Christophe Ullrich, Georges Heyen, Carine Gerkens, Variance of Estimates in Dynamic Data Reconciliation, *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 26, pp. 357-362, (2009).
- [12] José Plácido, Alexandre Almeida Campos, Daniel Ferraz Monteiro, Data Reconciliation Practice at a Petroleum Refinery Company in Brazil, *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 777-782, (2009).
- [13] Narasimhan S., Jordache C., *Data Reconciliation and Gross Error Detection*, Gulf Publishing Company, (2000).
- [14] Ljung L., Soderstrom T., *Theory and Practice of Recursive Identification*, MIT Press, (1983).
- [15] Ogata K., *Discrete-Time Control Systems*, Prentice Hall, (1995).
- [16] Downs J.J., Vogel E.F., A Plant-Wide Industrial Process Control Problem, *Computers Chem. Engng.*, 17, 245-255, (1993).
- [17] P. R., Lyman and C., Georgakis, Plant-Wide Control of the Tennessee Eastman Problem, *Computers Chem. Engng.*, 19, 321-331, (1995).
- [18] Ricker N.L., Tennessee Eastman Challenge Archive, <http://depts.washington.edu/control/LARRY/TE/download.html>, 2.1. (2009).