

تشخیص عیوب تدریجی همزمان در سیستم رآکتور همزن دار پیوسته غیرهم‌دما



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

[20.1001.1.23223146.1400.8.1.8.7](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1400.8.1.8.7)

نشریه علمی غیرنخبی در مهندسی برق

دوره ۸ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۰

صفحات ۱۳۳ الی ۱۵۴

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

حسین صفایی پور^۱، مهدی فروزانفر^۲ و امین رضانی^۳

^۱دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران،
h.safaeipour@iauahvaz.ac.ir

^۲نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران،
m.forouzanfar@iauahvaz.ac.ir

^۳استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران و استادیار، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران. ramezani@modares.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

در فرآیندهای صنعتی، رآکتورهای حرارتی با رفتار دینامیکی غیرخطی حلقه‌بسته معرفی می‌شوند و تشخیص به‌موقع عیوب تدریجی همزمان رسوب در بخش‌های انتقال حرارت آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین منظور، در این مقاله یک روش تشخیص عیب تدریجی جدید برای کاربرد در سیستم رآکتور همزن دار پیوسته غیرهم‌دما (CSTR) تحت کنترل حلقه‌بسته در حضور توأم نویزهای گوسی و غیرگوسی، ارائه شده است. در این روش، ابتدا تخمین بردار حالت، به‌وسیله تخمین گر فیلتر ذرات انجام شده و با بهره‌گیری از داده‌های اندازه‌گیری سیگنال مانده اولیه تولید می‌شود. سپس، با تخمین بردار عیب و طراحی دو حد آستانه متغیر و ثابت، با پایش برخت سیستم و استفاده از روش ارزیابی پیشنهادی، ضمن افزایش قابلیت آشکارسازی عیب، از تشخیص کاذب، جلوگیری می‌شود. علاوه بر آن، به منظور برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه، پیش‌بینی رفتار عیوب تدریجی با استفاده از روش شناسایی گوس-نیوتن مورد توجه قرار گرفته است. در پایان به منظور ارزیابی این رویکرد، تشخیص عیوب تدریجی همزمان رسوب در بخش انتقال حرارت سیستم CSTR، شبیه‌سازی و نتایج ارزیابی کمی به‌واسطه تشکیل ماتریس اختلاط، ارائه می‌شود.

تشخیص عیب،

شناسایی رفتار عیب تدریجی،

فیلتر ذرات، مبتنی بر مدل،

میانگین متحرک نمایی.



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1400.8.1.8.7](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1400.8.1.8.7)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.8, No.1

Spring and Summer 2021

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

Simultaneous Incipient Faults Diagnosis in the Non-Isothermal Continuous Stirred-Tank Reactor

Hossein Safaeipour¹, Mehdi Forouzanfar² and Amin Ramezani³

¹Ph.D. Candidate, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, h.safaeipour@iauahvaz.ac.ir

²**Corresponding Author**, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, m.forouzanfar@iauahvaz.ac.ir

³Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, and Electrical and Computer Engineering Department, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran, ramezani@modares.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

Exponential moving average,
Fault diagnosis,
Incipient fault trend
prediction,
Model-based,
Particle filter.

In chemical processes, thermal reactors are described by nonlinear closed-loop dynamic models. Timely detection of simultaneous fouling phenomena in the heat transfer system is a concern of this art. In this work, a new incipient fault diagnosis approach is proposed for application in the closed-loop non-isothermal continuous stirred-tank reactor (CSTR) system that is subjected to simultaneous Gaussian and non-Gaussian noises. First, the state vector is estimated by applying the well-known particle filter estimator. Then, the primary residual signal is generated using the system measurements, and the fault vector estimation is obtained. After that, by an adaptive either fixed threshold design applied in the online monitoring devised with the proposed evaluation technique, while the fault detectability is improved, the false detection problem is restricted to the system permitted number. Bank on, preventive maintenance scheduling also incipient fault trend prediction have become possible using the Gauss-Newton identification method. Finally, in order to evaluate the proposed approach, the simultaneous fouling incipient fault diagnosis over the heat transfer unit built-in nonlinear closed-loop CSTR system is considered. Furthermore, the confusion matrix and associated evaluation indices are employed to assess the simulation results quantitatively.

۱ - مقدمه

عیوب تدریجی دارای دامنه کمتر از ۱۰٪ دامنه سیگنال اصلی با نرخ رشد پایین در مقادیر پارامترهای سیستم هستند و به دلیل دینامیک بسیار کند، به راحتی توسط نامعینی‌های سیستم مخفی می‌شوند [۱]. همچنین برخی از خواص سیستم نظیر غیرخطی بودن رفتار سیستم، استفاده از کنترل حلقه بسته و حضور نامعینی‌های تصادفی، تشخیص عیب تدریجی را دشوارتر می‌سازد [۲].

یکی از سیستم‌های حساس پر کاربرد در فرآیندهای صنعتی نظیر پتروشیمی، نفت و تولید فرآورده‌های شیمیایی، رآکتور همزن‌دار پیوسته^۱ (CSTR) غیرهم‌دما تحت کنترل حلقه بسته می‌باشد که علاوه بر رفتار غیرخطی، آلوده به نامعینی‌هایی با توزیع گوسی و غیرگوسی است. این نامعینی‌ها بصورت همزمان مشتمل و نه محدود به نامعینی در نرخ جریان ماده انتقال حرارت، غلظت مواد، دمای رآکتور، دمای مواد ورودی و اندازه‌گیری‌ها می‌باشند [۳، ۴]. با این وجود، به دلیل ماهیت طراحی متعارف این سیستم‌های صنعتی، کلاس دقت تجهیزات پایش عیوب عموماً پایین بوده و تنظیمات حفاظتی صرفاً برای تشخیص عیوب ناگهانی انجام می‌شود. از این رو، عموماً در صنعت قابلیت تشخیص عیوب تدریجی وجود ندارد که این کاستی می‌تواند منجر به حوادث پرهزینه و بعضاً غیر قابل جبران گردد. بعنوان مثال، خطای اندازه‌گیری ناشی از رسوب حسگر نازل^۲ در ورودی آب نیروگاه هسته‌ای، بطور میانگین باعث کاهش ۱ تا ۲ درصدی توان نیروگاه می‌شود. همچنین، نشت کوچک از کانترینر نیتروسولولز^۳ منجر به حادثه در بندر تیانجین^۴ چین گردید [۲]. از این رو استفاده از یک روش آشکارسازی و تفکیک عیب^۵ (FDI) با در نظر گرفتن شرایط واقعی سیستم‌های صنعتی می‌تواند از چنین حوادثی جلوگیری نماید [۵].

رویکردهای تشخیص عیب تدریجی در سیستم‌های حلقه بسته، بدون در نظر گرفتن نامعینی، با اعمال محدودیت بر بخش‌های مختلف سیستم از جمله بخش فیدبک در [۶] یا با فرض محدود کننده قابل تفکیک بودن سیستم به زیر سیستم‌های سریع و کند با ابعاد متفاوت، بدون در نظر گرفتن غیرخطی‌های مدل نشده در [۷، ۸] ارائه شده است. در رویکردی دیگر، با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل یا اغتشاش محدود فرآیند و اعمال محدودیت در بخش غیرخطی سیستم، تشخیص عیب تدریجی در حسگر و عملگر ارائه شده است [۹، ۱۰]. علاوه بر آن، تشخیص عیب تدریجی با فرض در دسترس بودن تمامی حالت‌ها و با در نظر گرفتن نامعینی غیرساختار یافته غیرخطی [۱۱] و با شرط لیبشیتز بودن بخش غیرخطی، کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری بخش خطی سیستم و هم‌رتبه بودن ماتریس مشخصات عیب با ماتریس ورودی‌های سیستم، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. در تمامی روش‌های ارائه شده، علاوه بر شروط محدودیت کننده، به دلیل عدم در نظر گرفتن نویز، استفاده عملی از این روش‌ها در سیستم‌های صنعتی با چالش جدی مواجه خواهد شد.

^۱ Continuous Stirred-Tank Reactor

^۲ Venturi

^۳ Nitrocellulose

^۴ Tianjin

^۵ Fault Detection Isolation

در این راستا، با در نظر گرفتن نویز با توزیع گوسی، صرفاً برای تشخیص عیب تدریجی بایاس حسگر با استفاده از الگوریتم تخمین شبه تفکیک بایاس^۱ که به نحوی از تعریف مشتق نیز استفاده می‌نماید، روشی پیشنهاد گردید که کاربرد آن محدود به سیستم خاص مورد مطالعه بوده است [۱۳]. همچنین، در کلاس خاصی از سیستم غیرخطی پیوسته لپشیتز دارای اغتشاشات تصادفی براونین^۲، روش تشخیص عیب با رویکرد جداسازی اغتشاشات تصادفی از سیستم و معادلات دیفرانسیلی ایتو^۳ برای سیستم تحت بررسی، استفاده شده است. اما، علیرغم بیان قابلیت این روش در تشخیص عیب تدریجی، نتایج مربوطه ارائه نشده و مشخصه مهم زمان تشخیص عیب نیز تشریح نشده است [۱۴]. در تحقیقی دیگر، در یک سیستم چند مدلی^۴ حلقه بسته تحت نویزهای تصادفی، با استفاده از فیلتر ذرات^۵ (PF)، ارزیابی مانده و حد آستانه تطبیقی بر اساس شاخص احتمال لگاریتمی^۶ تشخیص عیب تدریجی انجام شده است. شرط معلوم بودن عیب، معلوم بودن مدل کنترل کننده و حجم محاسبات قابل توجه این روش، از جمله محدودیت‌های آن می‌باشد و ماتریس انتقال مدل‌ها نیز خطی فرض شده است [۱۵].

از این رو، با توجه به کلاس این سیستم‌ها، نیاز به ارائه یک روش عمومی ساختار یافته به منظور تشخیص عیوب تدریجی همزمان فرآیندی، عملگری و سنسوری در سیستم‌های غیرخطی حلقه بسته آلوده به نویزهای توأم گوسی و غیرگوسی ضروری است. بنابراین، در این مقاله به مساله تشخیص عیوب تدریجی همزمان در سیستم‌های صنعتی دارای رآکتورهای حرارتی واکنشی با مدل غیرخطی حلقه بسته تحت نویزهای گوسی و غیرگوسی، پرداخته شده است و نوع عیب تدریجی نیز برای شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، رسوب اجزاء مجموعه‌های انتقال حرارت در نظر گرفته شده است.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم، ابتدا رویکردی برای تشخیص عیوب تدریجی همزمان مبتنی بر مدل در سیستم‌های غیرخطی حلقه بسته تحت نویزهای گوسی و غیرگوسی، ارائه شده است. پس از آن، شناسایی پارامترهای مدل عیب تدریجی و پیش‌بینی رفتار آن با هدف برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه، انجام شده است. در بخش سوم، صورت مساله تشخیص عیب تدریجی برای سیستم CSTR در قالب روش پیشنهادی تدوین شده است. در بخش چهارم به شبیه‌سازی روش پیشنهادی به منظور تشخیص و شناسایی پارامترهای مدل عیوب تدریجی همزمان در حضور توأم نویزهای گوسی و غیرگوسی برای سیستم CSTR، پرداخته شده و در انتها، بخش پنجم به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲- صورت مساله و رویکرد حل

در این بخش، با بهره‌گیری از ایده‌های کاربردی تشخیص عیب در سیستم‌های حلقه باز و توسعه آن برای کاربرد در سیستم‌های حلقه بسته، تشخیص عیوب تدریجی بصورت برخط در سیستم‌های حلقه بسته غیرخطی گسسته آلوده به نامعینی‌های با توزیع غیرگوسی بصورت نویز فرآیند و با توزیع گوسی برای نویز اندازه‌گیری مورد نظر می‌باشد. مدل سیستم غیرخطی گسسته حلقه بسته به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

^۱ Pseudo Separate-Bias Estimation Algorithm

^۲ Brownian

^۳ Itô

^۴ Multi-Model

^۵ Particle Filter

^۶ Logarithm Likelihood Index

$$\Sigma_1: \begin{cases} x_{k+1} = g(x_k, u_k) + \Gamma(x_k)f_k + w_k \\ y_k = C_k x_k + v_k \\ u_k = \phi(x_k, y_k, u_{refk}) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن $x_k \in \mathbb{R}^n$ و $y_k \in \mathbb{R}^p$ بردارهای حالت و خروجی سیستم، $g(\cdot)$ تابع غیرخطی سیستم، $f_k \in \mathbb{R}^m$ بردار عیب (تدریجی نمایی)، $C_k \in \mathbb{R}^{p \times n}$ ماتریس اندازه گیری (خروجی)، $u_k \in \mathbb{R}^q$ بردار ورودی سیستم، u_{ref} و $\phi(\cdot)$ به ترتیب بردار سیگنال مرجع و قانون کنترل فیدبک غیرخطی، $w_k \in \mathbb{R}^n$ و $v_k \in \mathbb{R}^p$ نیز به ترتیب بردار نویز فرآیند غیرگوسی و نویز اندازه گیری گوسی با مشخصات آماری معلوم می باشند. $\Gamma(x_k) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ یک ماتریس تابع توزیع معلوم مرتبط با عیب است، اگر به x_k وابسته باشد عیب ضربی بوده و بیانگر عیب اجزاء سیستم^۱ و در صورتی که این تابع به x_k وابسته نباشد، بیانگر عیب جمعی^۲ بوده که معمولاً نشان دهنده وجود انحراف^۳ در عملگر یا حسگر است [۱۶].

در رابطه (۱) اگر بردار f_k بصورت $f_{i,k}$ نشان داده شود و بیانگر i -امین جزء از بردار عیب در زمان k باشد، عیب تدریجی $f_{i,k}$ بصورت رابطه (۲) تعریف می شود [۱۷]:

$$f_{i,k} = \begin{cases} 0, & 0 \leq k < \theta_{2,i} \\ \alpha_i(1 - e^{-\theta_{1,i}(k-\theta_{2,i})}) + w_{i,k}^f, & \theta_{2,i} \leq k \end{cases} \quad (2)$$

که در آن α_i بیان گر بیشینه دامنه i -امین جزء از بردار عیب است. $\theta_{1,i} > 0$ یک ضریب نامعلوم بوده و بیانگر نرخ رشد عیب در بردار حالت x_i و $\theta_{2,i}$ بیانگر زمان رخداد i -امین عیب است. w_k^f نیز یک نویز گوسی با ماتریس کواریانس $Q_k^f > 0$ ، که بیانگر نویز بر معادله رشد عیب تدریجی در است و ارتباطی با w_k و v_k نیز ندارد.

۲-۱- فرض های مساله

فرض ۱: سیستم غیرخطی شرط لپشیتز را برآورده می کند [۱۸].

فرض ۲: برای تعیین حد آستانه تشخیص عیب، سیستم سالم و در شرایط حالت دائم در نظر گرفته شده است.

فرض ۳: برای جلوگیری از بایاس در تخمین^۴ بردار حالت سیستم، رابطه $\text{rank } C_{k+1}\Gamma(x_k) = \text{rank } \Gamma(x_k)$ برقرار است.

فرض ۴: با توجه به امکان مشخص بودن متغیر مربوط به دامنه سیگنال عیب (α_i) در مدل (۲)، این پارامتر ثابت فرض شده است.

۲-۲- آشکارسازی، جداسازی، شناسایی پارامترهای مدل عیب و پیش بینی رفتار عیب تدریجی

برای حل مساله، توسعه روش های تشخیص عیب تدریجی در سیستم های حلقه باز غیرخطی با شرایط مفروض مشابه در نویز فرآیند و نویز اندازه گیری در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مدل کنترل کننده معمولاً در دسترس نیست، سیگنال کنترلی سیستم برای تخمین بردار حالت سیستم استفاده می شود. لذا، در این رویکرد تولید مانده با محدود نمودن اعوجاج های ناشی از نامعینی های گوسی و غیرگوسی بواسطه فیلتر ذرات و کاهش اثر آن ها با استفاده از فیلترهای مناسب، برای تشخیص برخط عیوب

¹ Component Fault

² Additive

³ Offset

⁴ Unbiased Estimation

تدریجی همزمان مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه اثر عیوب تدریجی در زمان‌های اولیه با تحریف ساختار ماتریس کواریانس نمایان می‌شود، در حل مساله به این موضوع توجه ویژه شده است [۱۹].

برای سیستم حلقه بسته غیرخطی (۱) با در نظر گرفتن فرض ۱ تا ۴، مراحل کلی الگوریتم حل مساله در ادامه در چهار بخش مجزا تشریح شده است: ۱. تخمین بردار حالت \hat{x}_k با استفاده از فیلتر ذرات (PF) و تخمین مولفه‌های بردار f_k ، ۲. تعیین حد آستانه ثابت و متغیر تشخیص عیب برای بردار f_k در شرایط حالت دائم بدون عیب، ۳. پایش سیستم برای تشخیص عیب تدریجی بواسطه بررسی عبور مولفه‌های بردار f_k از حد آستانه تعیین شده و ۴. پس از مرحله ارزیابی و تشخیص عیب، شناسایی پارامترهای θ_1 و θ_2 از بردار عیب تدریجی φ_i (میانگین متحرک نمایی وزنی^۱ بردار f_k) با استفاده از روش شناسایی گوس-نیوتن^۲ (GNM).

۲-۲-۱- تخمین بردار حالت سیستم و بردار عیب

بر اساس مدل سیستم گسسته (۱)، مدل تخمین گر مطابق با رابطه (۳) در نظر گرفته شده است:

$$\Sigma_2: \begin{cases} \hat{x}_{k+1} = g(\hat{x}_k, u_k) + \Gamma(\hat{x}_k) f_k \\ \hat{y}_k = C_k \hat{x}_k \end{cases} \quad (3)$$

که در آن $\hat{x}_k \in \mathbb{R}^n$ و $\hat{y}_k \in \mathbb{R}^p$ به ترتیب تخمین بردارهای حالت و خروجی سیستم و $u_k \in \mathbb{R}^q$ بردار ورودی کنترلی سیستم می‌باشد. با توجه به اینکه در سیستم (۱) عیب به عنوان یک ورودی ناشناخته سیستم در نظر گرفته شده، می‌بایست تخمین دقیقی از آن انجام گردد. از طرفی، سیستم بصورت همزمان تحت نامعینی‌هایی با توزیع گوسی، غیرگوسی و خطای مدل‌سازی قرار دارد.

ابتدا بر مبنای تخمین \hat{x}_{k-1} و توزیع غیرگوسی تصادفی با استفاده از اطلاعات در دسترس از نویز فرآیند، تعداد N ذره اولیه، \hat{x}_{k-1}^j ($j = 1, \dots, N$) تولید می‌شود. مقدار N با توجه به حد بهینه دقت تخمین و تلاش محاسباتی^۳ تعیین می‌گردد [۱۷]. با استفاده از تابع غیرخطی سیستم $g(\cdot)$ ، بردار $\hat{x}_{k|k-1}^j$ به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\hat{x}_{k|k-1}^j = g(x_{k-1}^j, u_{k-1}), \quad (j = 1, \dots, N) \quad (4)$$

تخمین $\hat{x}_{k|k-1}$ و کواریانس آن $P_{k|k-1}$ به ترتیب از روابط (۵) و (۶) بدست می‌آید.

$$\hat{x}_{k|k-1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \hat{x}_{k|k-1}^j \quad (5)$$

$$P_{k|k-1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{x}_{k|k-1}^j - \hat{x}_{k|k-1})(\hat{x}_{k|k-1}^j - \hat{x}_{k|k-1})^T \quad (6)$$

سپس با استفاده از فیلتر ابداعی^۴، بردار عیب (مشمول بر نامعینی‌های سیستم) از رابطه (۷) بدست می‌آید [۱۷].

$$\hat{f}_{k-1} = L_k \tilde{y}_k = L_k (y_k - C_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (7)$$

که در آن L_k با استفاده از قضیه گاوس-مارکوف به شرح و جزئیات بیان شده در [۱۷] محاسبه می‌شود:

¹ Exponentially Weighted Moving Average

² Gauss-Newton Method

³ Computational Effort

⁴ Innovation Filter

$$\tilde{y}_k = C_k \Gamma_{k-1} f_{k-1} + e_k \quad (8)$$

$$\tilde{R}_k = E[e_k e_k^T] = C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k \quad (9)$$

$$L_k = (F_k^T \tilde{R}_k^{-1} F_k)^{-1} F_k^T \tilde{R}_k^{-1} \quad (10)$$

در این روابط، $F_k = C_k \Gamma_{k-1}$ ، $\Gamma_{k-1} = \Gamma(\hat{x}_{k-1})$ ، بردار نامعینی‌های سیستم و R_k واریانس نویز اندازه‌گیری می‌باشند. پس از تخمین بردار عیب با استفاده از روابط (۱۰) و (۷)، ذرات به‌دست آمده در رابطه (۴) با استفاده از رابطه (۱۱) بازنگری می‌شوند.

$$\hat{x}_{k|k-1}^j = g(x_{k-1}^j, u_{k-1}) + \Gamma(x_{k-1}^j) \hat{f}_{k-1}, \quad (j = 1, \dots, N) \quad (11)$$

عملیات نمونه‌برداری نقاط مهم^۱ می‌بایست بر روی ذرات به‌دست آمده در رابطه (۱۱) انجام شود تا در تخمین‌های مرحله بعد بعنوان جایگزین ذرات قبلی در رابطه (۴) استفاده شود. به این منظور، ابتدا احتمال نسبی q^j هر ذره با استفاده تابع چگالی احتمال^۲ (PDF) نویز اندازه‌گیری با توزیع گوسی، بصورت رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$q_k^j = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} e^{-\frac{(y_k - C\hat{x}_{k|k-1}^j)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (12)$$

سپس نرمال‌سازی احتمال نسبی ذرات، با استفاده از رابطه (۱۳) انجام می‌شود:

$$q_k^j = \frac{q_k^j}{\sum_{m=1}^N q_k^m} \quad (13)$$

که در آن جمع تجمعی^۳ احتمال‌های نسبی نرمال برابر با یک می‌شود و یک توزیع یکنواخت^۴ دارد. بر همین اساس، با استفاده از انتخاب تصادفی روی تابع توزیع تجمعی^۵ (CDF) احتمال نسبی ذرات در رابطه (۱۳)، نمونه‌سازی مجدد^۶ ذرات بر اساس احتمال آماری آن‌ها انجام شده و به طور متوسط، انتخاب ذرات با وزن بالاتر صورت می‌پذیرد و یک مجموعه از ذرات جدید $\hat{x}_{k|k}^j$ از بین مجموعه ذرات قبلی به‌واسطه احتمال نسبی q_j هر ذره، تولید می‌شود [۲۰].

برای بهبود عملیات نمونه‌سازی مجدد ذرات و در جهت حفظ همبستگی ذرات جدید با نامعینی‌های فرآیند و جلوگیری از میرا شدن تخمین، پیشنهاد مطرح شده در این مقاله، استفاده از توزیع غیرگوسی بر اساس اطلاعات در دسترس نویز غیرگوسی فرآیند است. برای این منظور، بر اساس رابطه (۱۴) میانگین ذرات جدید محاسبه و بر اساس توزیع غیرگوسی تصادفی بر مبنای اطلاعات نویز فرآیند، ذرات $x_{k|k}^j$ مطابق با رابطه (۱۵) برای جایگذاری در رابطه (۴) در مرحله بعدی به‌دست می‌آید. برای سادگی محاسبات، مراحل تخمین بیان شده، در الگوریتم ۱ لیست شده است.

$$\hat{x}_{k|k} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \hat{x}_{k|k}^j \quad (14)$$

$$x_{k|k}^j = \hat{x}_{k|k} + w_{k|k}^j \quad (15)$$

¹ Importance Sampling

² Probability Density Function

³ Cumulative Sum

⁴ Uniform Distribution

⁵ Cumulative Distribution Function

⁶ Resampling

الگوریتم ۱: تخمین بردار حالت و بردار عیب توسط تخمینگر PF

مرحله ۱، شروع: بردار حالت اولیه \hat{x}_0 با کواریانس P_0 و مقدار اولیه سیگنال عیب صفر با کواریانس P_{-1}^f است.

مرحله ۲، تخمین عیب: بردار ذرات پیشین $\hat{x}_{k|k-1}^j$ با استفاده از رابطه (۴) و تخمین متغیر حالت و کواریانس آن با استفاده از روابط (۵) و (۶) تعیین شده و پس از آن برای برآورد مقادیر بردار عیب، به ترتیب روابط (۹)، (۱۰) و (۷) محاسبه می شود.

مرحله ۳، بروزرسانی تخمین بردار حالت: با برآورد مقادیر رابطه (۷)، محاسبه بردار ذرات بازنگری شده پیشین بر اساس رابطه (۱۱).

مرحله ۴، نمونه گیری نقاط مهم: محاسبه احتمال نسبی q^j هر ذره از رابطه (۱۲) و نرمال سازی آن ها با استفاده از رابطه (۱۳).

مرحله ۵، نمونه سازی مجدد: با هدف انتخاب ذرات دارای احتمال نسبی بیشتر از بین $\hat{x}_{k|k-1}^j$ ها، با انتخاب تصادفی از تابع جمع انباره ای احتمالات نسبی q^j در رابطه (۱۳)، مجموعه ذرات جدید $\hat{x}_{k|k}^j$ به دست می آید.

مرحله ۶، نمونه سازی ذرات پسین: تولید مجموعه ذرات پسین $\hat{x}_{k|k}^j$ مطابق رابطه (۱۵).

۲-۲-۲- تعیین سیگنال مانده

در الگوریتم ۱، تخمین سیگنال عیب و بردار حالت سیستم بصورت همگام بوده و خطای تخمین مرتبط نیز، به دست می آید. اگر عیبی وجود نداشته باشد، بدین معنی است که مقادیر بردار عیب برابر با صفر بوده و تخمین عیب با عدم قطعیت های سیستم مرتبط است که به یک بازه مشخص $[\gamma^- \gamma^+]$ همگرا می شود. به محض رخداد عیب، مقدار یک یا چند مؤلفه از بردار عیب از این محدوده خارج خواهد شد. اما با توجه به نامعینی های غیر گوسی، پهنای این باند مقادیر قابل ملاحظه ای دارد.

راهکار ارائه شده برای کاهش مقدار γ ، ایجاد یک پنجره متحرک^۱ برای محاسبه مقدار میانگین هر المان از تخمین بردار عیب، در یک قاب ثابت زمانی^۲ است. علاوه بر آن، بدلیل تمایزناپذیر بودن عیوب تدریجی در زمان های اولیه از نامعینی های تصادفی در سیگنال مانده، با توجه به برخط بودن رویکرد تشخیص عیب و محدودیت تلاش محاسباتی، مراحل فیلتر سیگنال مانده اولیه و تولید مانده نهایی بشرح ذیل می باشد:

$$W_{i,k} = \frac{\sum_{j=k-l-1}^{k-1} f_{i,j}}{l+1} \quad (16)$$

$$\bar{W}_{i,k} = W_{i,k} * f_{i,k-1} \quad (17)$$

$$R_{i,k} = \bar{W}_{i,k}^\tau \quad (18)$$

که W_i میانگین متحرک از سیگنال عیب f_i می باشد، $l = 2^t$ طول پنجره مذکور را تعیین می کند [۲۱] و مقدار آن نیز با توجه به زمان مجاز تشخیص عیب تعیین می شود [۱۵]. \bar{W}_i فیلتری از سیگنال عیب و R_i سیگنال مانده i -ام است که برای تشخیص

¹ Moving Window

² Fixed Time Frame

عیوب تدریجی ($i=1, 2, \dots, q$) مورد استفاده قرار می گیرد. ذکر این نکته ضروری است که در تعیین مقدار l ، زمان مجاز تاخیر در تشخیص عیب، قید اصلی و تعیین کننده است که توسط طراح سیستم حول مقادیر پیش فرض، تنظیم می شود.

۲-۲-۳- تعیین حد آستانه تشخیص عیب و ارزیابی مانده

مطابق آنچه بیان شد، اثر محسوس نامعینی های تعریف شده در مدل، مشتمل بر نویز غیرگوسی فرآیند، نویز گوسی اندازه گیری و خطای مدل سازی، بدون هیچگونه تعدیلی در بردار مانده اولیه و تخمین عیب ظاهر می شوند. اثر این نامعینی ها، در رابطه (۱۶) و (۱۷) تعدیل شده و در رابطه (۱۸) بردار مانده با کمترین وابستگی به این نامعینی ها، به دست می آید. از این بردار برای محاسبه حد آستانه ثابت تشخیص قطعی عیب تدریجی به روش مونت-کارلو، مطابق با رابطه (۱۹) استفاده شده است [۱۷]:

$$\gamma_{Fi} = \max_k |R_{i,k}| \quad (i = 1, \dots, q) \quad (19)$$

که در آن مقدار γ_{Fi} در شرایط سیستم بدون عیب، به نامعینی های سیستم مرتبط است. شایان ذکر است که به دلیل در نظر گرفتن بیشینه مقدار نامعینی در سیستم بدون عیب، انرژی سیگنال مانده در ایجاد توانایی عبور از حد آستانه ثابت، دارای اهمیت بالایی است. اما، در زمان عدم حضور نویز فرآیند و اندازه گیری و در نتیجه کاهش انرژی سیگنال مانده، ارزیابی با حد آستانه ثابت برای تشخیص عیب، تاخیر قابل توجهی در آشکارسازی عیب تدریجی به همراه دارد. لذا، استفاده از یک حد آستانه متغیر برای آشکارسازی عیب تدریجی، اجتناب ناپذیر است. در این مقاله، طراحی یک حد آستانه متغیر و روش ارزیابی هشدارهای دریافت شده بواسطه عبور سیگنال مانده از حد آستانه متغیر، ارائه شده است. برای این منظور، ابتدا حد آستانه متغیر γ_{Ai} برابر با حد آستانه ثابت از پیش تعیین شده، در نظر گرفته می شود و پس از آن با استفاده از γ_{Ai} تنظیم می شود.

استراتژی ۱: بروزرسانی حد آستانه متغیر

به ازای $(k-1) < j < (k-t \times l - 1)$ اگر عیبی تشخیص داده نشده باشد، حد آستانه متغیر مطابق با رابطه (۲۰) بروزرسانی می شود.

$$\gamma_{Ai}(k) = \frac{A_{mi}}{\log(\tau)} \times \max_k |R_{i(k-t \times l) \dots (k-1)}| \quad (20)$$

که در آن t و A_{mi} پارامترهای تنظیمی در طراحی حد آستانه متغیر هستند و برای کنترل هشدارهای کاذب^۱ (FA) و جلوگیری از تشخیص کاذب^۲ (FD) با مقادیر متناسب با مشخصات سیستم بدون عیب، در نظر گرفته می شوند.

در استراتژی ۱، به محض عبور یکی از مولفه های بردار مانده R_i از حد آستانه متغیر γ_{Ai} ، در راستای جلوگیری از تشخیص کاذب، منطق ارزیابی هشدارهای دریافت شده به شرح استراتژی ۱، به عنوان منطق تصمیم گیری در نظر گرفته شده است.

¹ False Alarm

² False Detection

استراتژی ۲: ارزیابی مانده بر اساس عبور از حد آستانه متغیر

اگر تعداد هشدارهای (N_1) بین بازه آخرین زمان بازنشانی^۱ (LRE) تا زمان نمونه برداری حاضر^۲ (CST) از تعداد نمونه معیوب قابل تحمل از پیش تعیین شده (Z)، بیشتر باشد و شرط $CV > \frac{N_1}{(CST-LRE+1)}$ نیز برقرار باشد، هشدار رخداد عیب صادر می گردد، در غیر این صورت، هشدار صادره کاذب بوده و نادیده گرفته می شود.

در استراتژی ۲ نیز، مقدار پارامتر تعداد نمونه قابل تحمل عیب توسط سیستم (Z) و پارامتر (CV) که کسری از هشدارهای ثبت شده نسبت به گام های سپری شده از اولین هشدار است، معیارهای کنترل تشخیص کاذب می باشند و نسبت آن ها با تعداد قطعی تشخیص کاذب، رابطه معکوس دارد. لذا در تعیین این دو پارامتر، یک مصالحه بر اساس دقت تشخیص عیب و میزان مجاز تشخیص کاذب سیستم، ضروری است. شایان ذکر است، در شرایطی که نامعینی ها باعث عدم کارایی حد آستانه متغیر برای تشخیص عیب می شوند، حد آستانه ثابت به عنوان معیار تشخیص قطعی عیب، مورد استفاده قرار می گیرد.

۲-۲-۴- شناسایی پارامترهای مدل و پیش بینی رفتار عیب تدریجی

پس از صدور هشدار قطعی رخداد عیب تدریجی از واحد ارزیابی مانده، برای تخمین پارامترهای مدل عیب تدریجی و پیش بینی رفتار آن، با توجه به مقدار ثابت α ، تخمین پارامترهای θ_1 و θ_2 در مدل غیرخطی (۲)، مورد نیاز است. با توجه به اینکه سیگنال مانده R_i تغییر یافته^۳ می باشد، نمی توان از آن برای شناسایی پارامترهای مدل عیب استفاده کرد. از طرفی تخمین عیب \hat{f}_i نیز به نویزهای گوسی و غیرگوسی آلوده می باشد. لذا به منظور شناسایی پارامترها و پیش بینی رفتار عیب تدریجی، اقدام اصلاحی بر تخمین بردار عیب \hat{f}_i ، اجتناب ناپذیر است.

میانگین متحرک نمایی وزنی (EWMA) بعنوان یک فیلتر با وزن دهی نمایی به مقادیر بردار عیب در هر گام، سیگنالی متعادل تر ارائه می نماید که تا حدود قابل قبولی نوسانات ناشی از نامعینی های تصادفی را کاهش داده و شناسایی سیگنال را امکان پذیر می سازد. به این منظور، با فرض معمول و منطقی محدود بودن نرخ رشد عیب تدریجی، سیگنال عیب \hat{f}_{k-1} بصورت رابطه (۲۱) فیلتر می شود:

$$\varphi_{k-1} = (I_q - \beta) \varphi_{k-2} + \beta \hat{f}_{k-1} \quad (21)$$

که در آن φ_{k-1} سیگنال عیب فیلتر شده توسط EWMA می باشد و $\beta \in (0,1)$ فاکتور مربوط به وزن فیلتر می باشد. بر اساس رابطه (۲۱)، وقتی β به سمت صفر میل کند، سیگنال خروجی فیلتر، نوسانات کمتری دارد [۲۲]. اما کاهش β ، منجر به افزایش تاخیر در رهگیری سیگنال ورودی به این فیلتر می شود [۲۳]. لذا، برای ایجاد یک مصالحه، با توجه به اینکه عیب تدریجی در زمان های رشد، روند مشخصی دارد، مقادیر $0/07 \leq \beta \leq 0/03$ می تواند ضمن فیلتر نمودن نامعینی ها، روند رشد سیگنال را با تاخیر مجاز رهگیری نماید. معیار قطعی انتخاب β نیز، همگرایی خطای شناسایی و معیار تنظیمی، زمان مجاز شناسایی بعد از رخداد عیب است.

¹ Last Reset Event

² Current Sampling Time

³ Manipulated

بر اساس رابطه (۲۱)، با استفاده از روش شناسایی غیرخطی گوس-نیوتن (GNM) تشریح شده در [۱۷]، θ_1 و θ_2 به دست خواهد آمد. برای این منظور، ابتدا یک مجموعه پیش‌بینی از رفتار φ در افق l مورد نیاز است که مطابق با رابطه (۲۲) بیان می‌شود [۱۷]:

$$Y = [\varphi_{i,k}, \varphi_{i,k+1}, \dots, \varphi_{i,k+l}] \quad (22)$$

که در این مقاله، یک تابع پیشنهادی، مطابق رابطه (۲۳)، برای محاسبه مقادیر این بردار در نظر گرفته شده است:

$$\varphi_j = (I_q - \beta) \varphi_{j-1} + \beta \hat{f}_j, (j = k, k + 1, \dots, k + l) \quad (23)$$

برای پیش‌بینی φ در افق l ، با توجه به اینکه رشد عیب بصورت تدریجی است، بعنوان یک ایده می‌توان از رفتار بردار عیب در زمان ابتدایی شروع به رشد تا زمان تشخیص، بعنوان داده‌های با ارزش از رفتار گذشته عیب استفاده نمود. سپس با روش برازش منحنی^۱ و روش ارزیابی^۲ آن، در هر گام پس از تشخیص عیب، الگویی برای شناسایی رفتار عیب تدریجی، تعیین نمود. علاوه بر آن، با در نظر گرفتن مدل عیب در رابطه (۲)، خطای تخمین بصورت رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود [۱۷]:

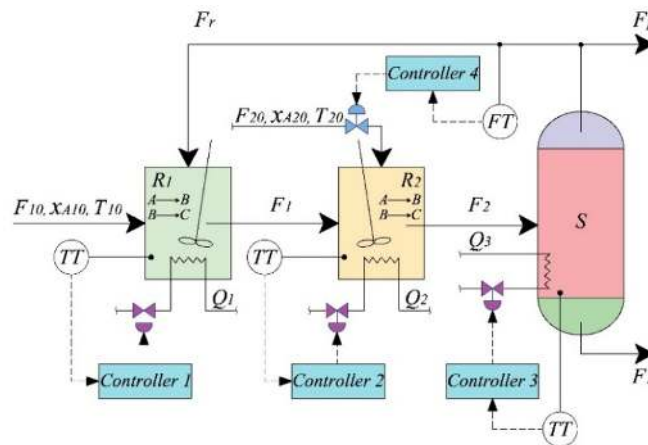
$$\varphi_{i,j} = \alpha_i (1 - e^{-\theta_{1i,j}(j-\theta_{2i,j})}) - \hat{\varphi}_{i,j} \quad (24)$$

پس از همگرایی و برآورد مقادیر بهینه $\hat{\theta}_1$ و $\hat{\theta}_2$ ، تخمین سیگنال عیب بصورت $\hat{\varphi}_{i,j} = \alpha_i (1 - e^{-\hat{\theta}_{1i,j}(j-\hat{\theta}_{2i,j})})$ محاسبه می‌شود.

در ادامه، با هدف تشخیص و شناسایی رفتار عیب تدریجی در یک سیستم صنعتی پیچیده، سیستم حلقه بسته غیرخطی صنعتی CSTR معرفی و نتایج شبیه‌سازی مربوطه ارائه می‌شود.

۳- معرفی سیستم CSTR

برای شبیه‌سازی روش تشخیص عیب تدریجی ارائه شده در این مقاله، سیستم غیرخطی صنعتی CSTR که به طور گسترده برای ارزیابی اثربخشی روش‌های پیشنهادی نظارت بر فرآیند استفاده شده است، در ادامه تشریح خواهد شد [۲۴]. شمای کلی این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. شمای کلی سیستم CSTR-Separator

^۱ Curve Fitting

^۲ Evaluation Technique

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این سیستم شامل دو رآکتور همزن دار^۱ و یک رآکتور جداکننده^۲ است. واکنش دهنده^۳ خام A با نرخ جریان^۴ F_{10} و F_{20} و دمای T_{10} و T_{20} برای تولید محصول مورد نیاز B وارد رآکتور همزن دار می شود و ممکن است یک محصول جانبی نامطلوب C نیز ایجاد شود. هر رآکتور با یک پوشش حرارتی برای انتقال گرما به/ از مخزن استفاده می شود. همچنین، به دلیل کوتاه بودن زمان اقامت واکنش دهنده در رآکتور جداکننده، هیچ واکنشی در آنجا رخ نمی دهد [۲۴]. بخار بازیابی شده از رآکتور جداکننده به دو بخش تقسیم می شود. یک بخش بعنوان محصول با نرخ جریان F_p و دیگری با نرخ جریان F_r دوباره به اولین رآکتور بازگردانده شده و محصول جانبی با نرخ جریان F_3 از فرآیند خارج می شود [۲۴]. [۲۵]. مشخصات و معادلات دینامیکی این سیستم در [۲۴] تعریف شده و متغیرهای فرآیند و مقادیر پارامترها نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر متغیرهای سیستم CSTR [۲۴, ۲۶]

متغیر	مقدار	متغیر	مقدار	متغیر	مقدار	متغیر	مقدار
V_1	$1/0 \text{ m}^3$	ρ	$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	τ_1	$-0/114$	$Q_{1,s}$	$4/9 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$
V_2	$0/5 \text{ m}^3$	R	$8/314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol.K}}$	τ_2	$10/8$	$Q_{2,s}$	$1/9 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$
V_3	1.0 m^3	c_p	$4/2 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$	A_{w1}	$1/5 \text{ m}^2$	$Q_{3,s}$	$1/3 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$
α_A	$3/5$	k_1	$2/77 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$	A_{w2}	$1/0 \text{ m}^2$	$Q_{1,min}$	$2/9 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$
α_B	$1/0$	k_2	$2/60 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$	A_{w3}	$1/5 \text{ m}^2$	$Q_{1,max}$	$5/8 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$
α_C	$0/5$	E_1	$5 \times 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$	$x_{A1,s}$	$0/331$	$Q_{2,min}$	$1/0 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$
α_r	$0/833$	E_2	$6 \times 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$	$x_{B1,s}$	$0/565$	$Q_{2,max}$	$2/0 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$
α_p	$0/107$	U_{w1}	$1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	$T_{1,s}$	510 K	$Q_{3,min}$	$2/9 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$
α_e	$0/06$	U_{w2}	$1500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	$x_{A2,s}$	$0/389$	$Q_{3,max}$	$5/8 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$
x_{A10}	1	U_{w3}	$2500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	$x_{B2,s}$	$0/509$	$F_{20,max}$	$10/8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
x_{B10}	0	ΔH_1	$-6/0 \times 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$	$T_{2,s}$	500 K	F_r	$50/4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
x_{A20}	1	ΔH_2	$-7/0 \times 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$	$x_{A3,s}$	$0/147$	$F_{20,s}$	$5/04 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
x_{B20}	0	T_{10}	300 K	$x_{B3,s}$	$0/636$	F_{10}	$5/04 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
$\lambda_{1,2}$	$0/16$	T_{20}	300 K	$T_{3,s}$	505 K	$F_{20,min}$	$0/504 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

همچنین، W_k بردار نویز فرآیند با ماتریس کواریانس Q_w است که به صورت غیر گوسی مطابق با رابطه (۲۵) توزیع شده است:

$$w_{ij} \sim N(0, \sigma_w^2) + D[-\sigma_w^2, \sigma_w^2] \quad (25)$$

¹ Stirred-Tank

² Flash Tank Separator

³ Reactant

⁴ Molar Flow Rate

که در آن $N(0, \sigma_w^2)$ با توزیع گوسی و واریانس σ_w^2 است و $D[-\sigma_w^2, \sigma_w^2]$ یک توزیع یکنواخت از $-\sigma_w$ تا $+\sigma_w$ است. نویز اندازه گیری گوسی با میانگین صفر و ماتریس کواریانس Q_v در نظر گرفته شده و مقدار آن برابر $\sigma_v I_3$ است. روابط کنترل کننده‌ها برای کنترل میزان جریان F_{20} و مبدل های حرارتی به ترتیب بصورت رابطه (۲۶) و (۲۷) در نظر گرفته شده‌اند:

$$\Sigma_3: \begin{cases} F_{1,k+1} = F_{10} + F_{r,k} \\ F_{20,k+1} = -\tau_1 F_{r,k} + \tau_2 \\ F_{2,k+1} = F_{1,k} + F_{20,k} \\ F_{p,k+1} = \alpha_p F_{2,k} \\ F_{3,k+1} = \alpha_e F_{2,k} \\ F_{r,k+1} = \alpha_r F_{2,k} \end{cases} \quad (26)$$

$$\Sigma_4: \begin{cases} Q_{1,k+1} = U_{w1} A_{w1} (T_{1,s}^2 - T_{1,k}^2) \sqrt{|(T_{1,s}^2 - T_{1,k}^2)|}, & |\Delta Q_1| \leq U_{w1} \\ Q_{2,k+1} = U_{w2} A_{w2} (T_{2,s}^2 - T_{2,k}^2) \sqrt{|(T_{2,s}^2 - T_{2,k}^2)|}, & |\Delta Q_2| \leq U_{w2} \\ Q_{3,k+1} = U_{w3} A_{w3} (T_{3,s}^2 - T_{3,k}^2) \sqrt{|(T_{3,s}^2 - T_{3,k}^2)|}, & |\Delta Q_3| \leq U_{w3} \end{cases} \quad (27)$$

علاوه بر آن، پدیده رسوب در مبدل حرارتی^۱ به عنوان عیب تدریجی فرض شده و برای جلوگیری از در نظر گرفتن مقاومت رسوب^۲ به عنوان یک ضریب ثابت، تابع توزیع عیب به عنوان یک تابع غیرخطی از حالت سیستم، مشابه آنچه در [۲۷, ۲۸] نتیجه گیری شده، در نظر گرفته شده است. عیوب تدریجی مفروض در این بخش، به عنوان یک مدل ریاضی در نظر گرفته شده‌اند:

$$f_{1,k} = \begin{cases} 0, & 0 \leq k \leq 8500 \\ 3.6(1 - e^{-0/011(k-8500)}) + w_{1,k}^f, & 8500 < k \end{cases} \quad (28)$$

$$f_{2,k} = \begin{cases} 0, & 0 \leq k \leq 9500 \\ 1.5(1 - e^{-0/009(k-9500)}) + w_{2,k}^f, & 9500 < k \end{cases} \quad (29)$$

$$\Sigma_5: \begin{cases} \Gamma(T_{1,k}) = -T(\lambda_1 \sqrt{T_{1,k}}) \\ \Gamma(T_{2,k}) = -T(\lambda_2 \sqrt{T_{2,k}}) \end{cases} \quad (30)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی سیستم CSTR

سیستم CSTR تشریح شده در بخش ۳، مطابق با مقادیر مندرج در جدول ۲ با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله، در ادامه ارائه شده است.

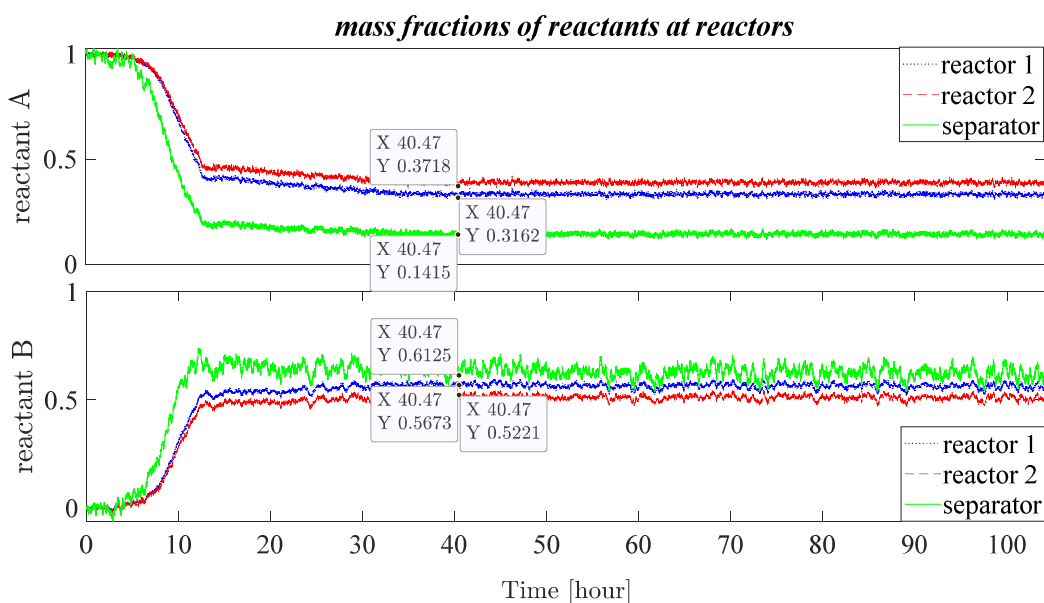
¹ Heat Exchanger Fouling Phenomena

² Fouling Resistance

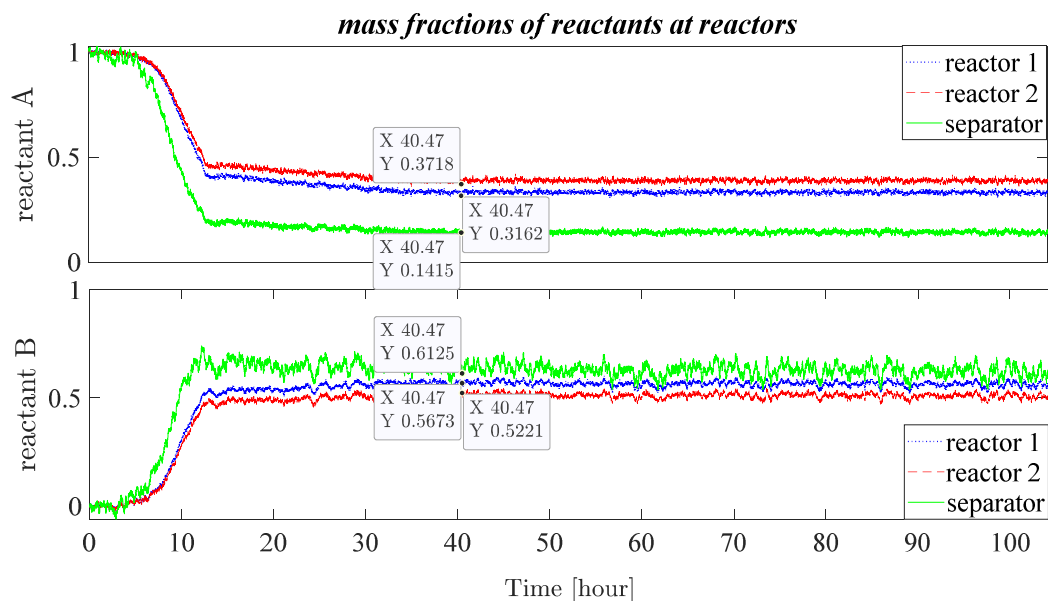
جدول ۲. مقادیر پارامترهای شبیه سازی

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
5	$\tau_{1,2}$	25	N (particles)
6	$Z_{1,2}$	1.5×10^{-5}	σ_w^2
0.8	$CV_{1,2}$	1.2×10^{-5}	σ_v^2
0.04	β	2	$A_{m1,2}$
25 s	T	1.5×10^{-5}	σ_f^2

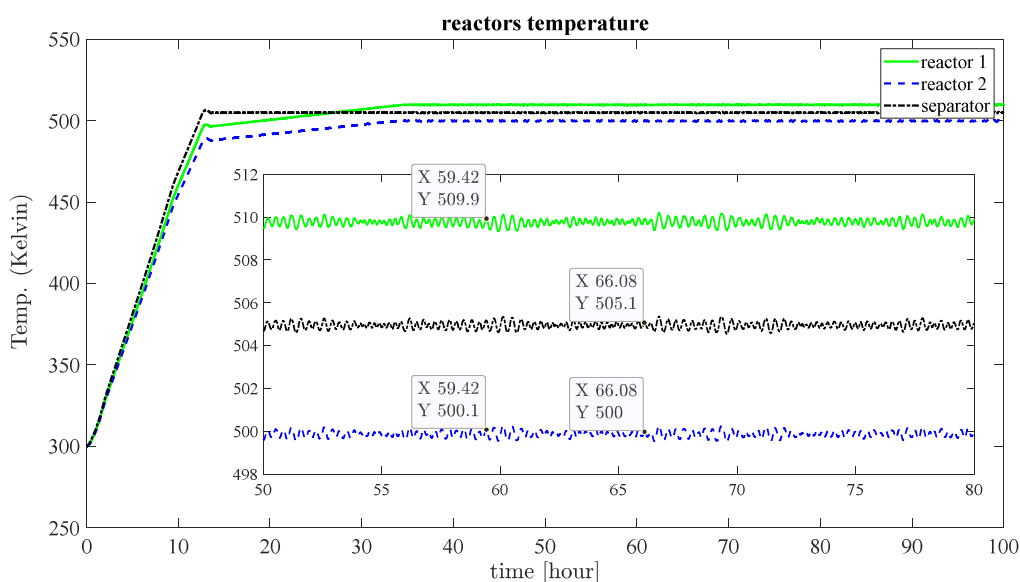
ابتدا، به منظور بررسی شرایط کاری سیستم (کسر جرمی واکنش دهنده ها و دمای رآکتور)، بردار حالت سیستم در



شکل ۲ و شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲. نمودار کسر جرمی واکنش دهنده‌ها در سه رآکتور

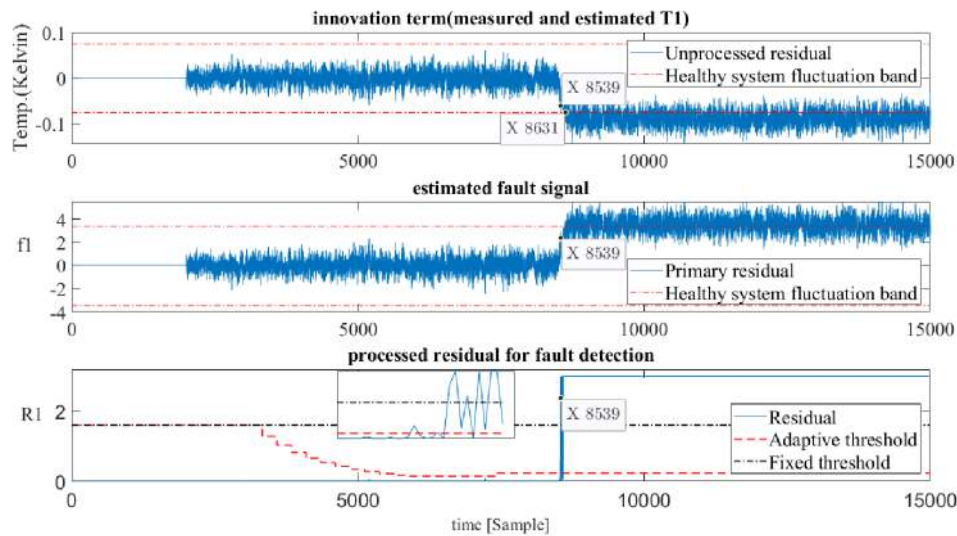


شکل ۳. نمودار دمای رآکتورها بر اساس درجه کلوین

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، شرایط حالت پایدار تقریباً پس از گذشت ده ساعت از عملکرد سیستم، حاصل می‌شود و پس از گذشت سی ساعت، اهداف کنترلی تعیین شده رهگیری شده و دمای رآکتورها نیز در نقاط تنظیم، کنترل شده است. اما به دلیل نامعینی‌های غیرگوسی، بردار حالت سیستم دارای نوسانات قابل ملاحظه‌ای است. بر اساس نمودار دمای رآکتورها در شکل ۳، به دلیل کوچک بودن اندازه عیب تدریجی نسبت مقادیر نامی سیستم، در زمان رخداد عیوب، $(k > 59/027)$ و f_1 و f_2 در شکل ۳، به دلیل عملکرد مقاوم^۱ حلقه فیدبک، تغییر محسوسی در نمودار دما رخ نداده و مخفی شدن عیوب تدریجی در

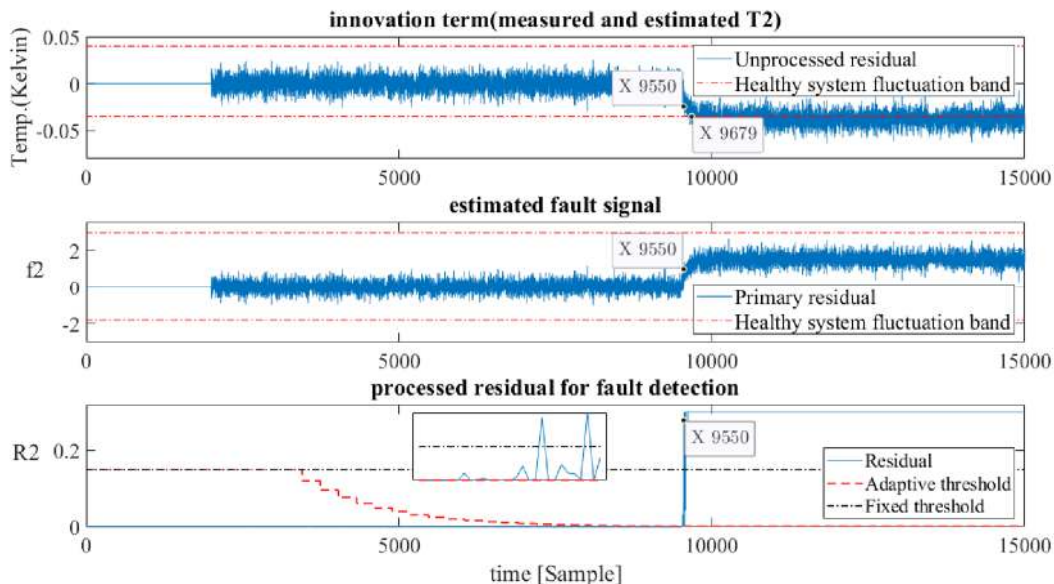
^۱ Robustness

سیکل حلقه بسته در این نمودارها بخوبی نشان داده شده است. نمودار سیگنال مانده و نحوه تشخیص عیب تدریجی رسوب در سیستم انتقال حرارت رآکتورهای شماره یک و دو، به ترتیب در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است.

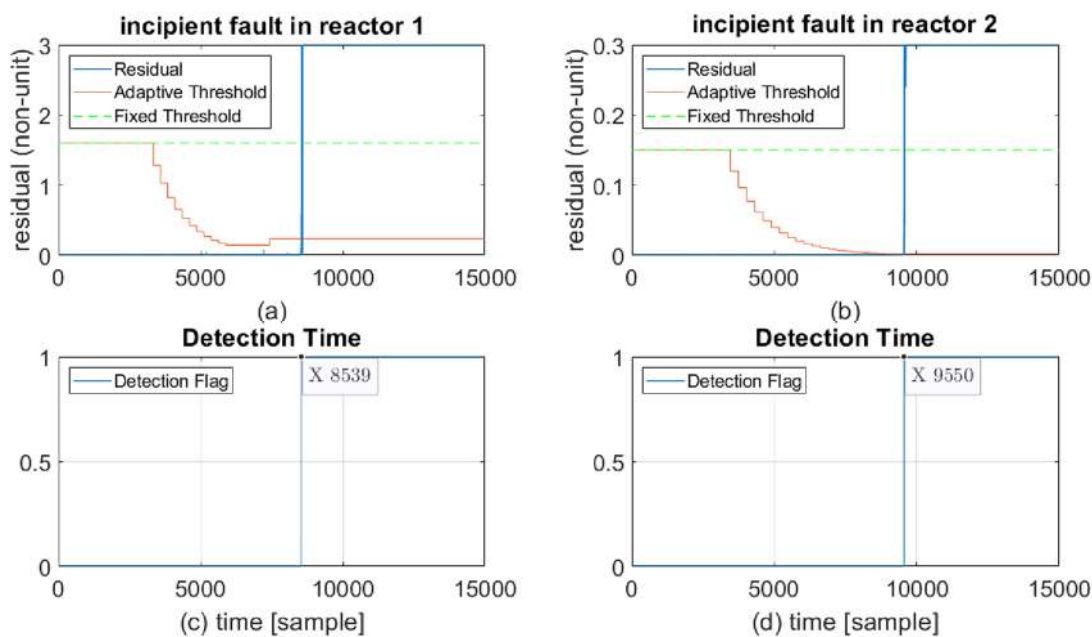


شکل ۴. نمودار سیگنال مانده و تشخیص عیب تدریجی رسوب در سیستم انتقال حرارت رآکتور شماره یک

همانطور که در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است، در نمودار مانده اولیه، حداکثر تاثیر عیوب تدریجی بر سیگنال های سیستم به ترتیب کمتر از ۰/۱ و ۰/۰۵ درجه کلوین برآورد شده است. مطابق با آنچه انتظار می رفت، عیوب تدریجی f_1 و f_2 با عبور از حد آستانه متغیر به ترتیب پس از گذشت ۳۹ و ۵۰ گام از زمان رخداد عیب مشتمل بر زمان تعیین شده برای منطق تصمیم گیری، تشخیص داده شده و زمان های تشخیص به همراه سیگنال مانده نهایی مورد ارزیابی نیز، در شکل ۶ نمایش داده شده است.

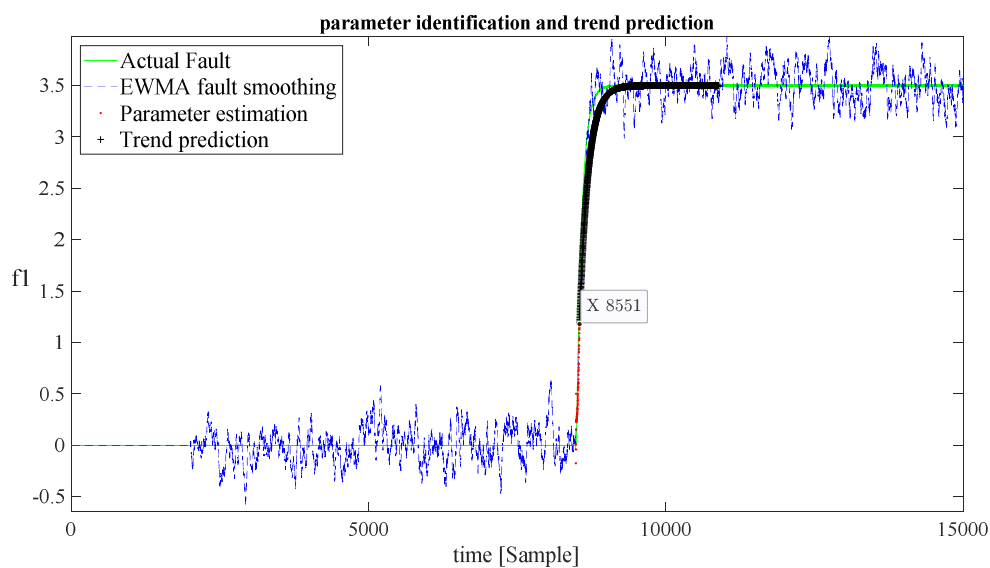


شکل ۵. نمودار سیگنال مانده و تشخیص عیب تدریجی رسوب در سیستم انتقال حرارت رآکتور شماره دو

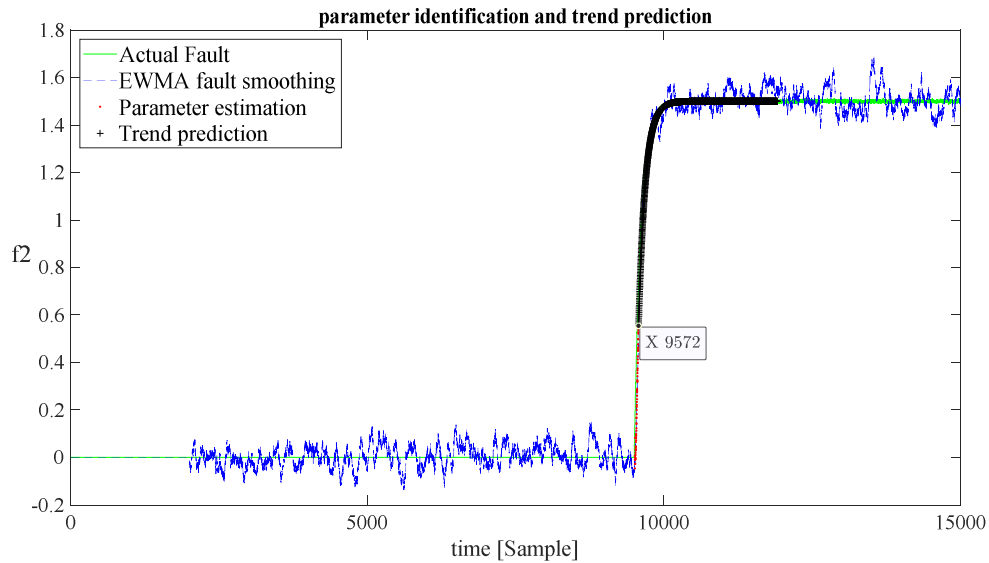


شکل ۶. نمودار زمان قطعی تشخیص عیوب تدریجی

با توجه به برخط بودن فرآیند تشخیص، پس از صدور هشدار رخداد عیب، واحد شناسایی پارامترهای مدل عیب فعال شده و بر اساس مطالب بیان شده در بخش ۲-۲-۴، این پارامترها شناسایی شده و در شکل ۷ و شکل ۸ نمایش داده شده است.



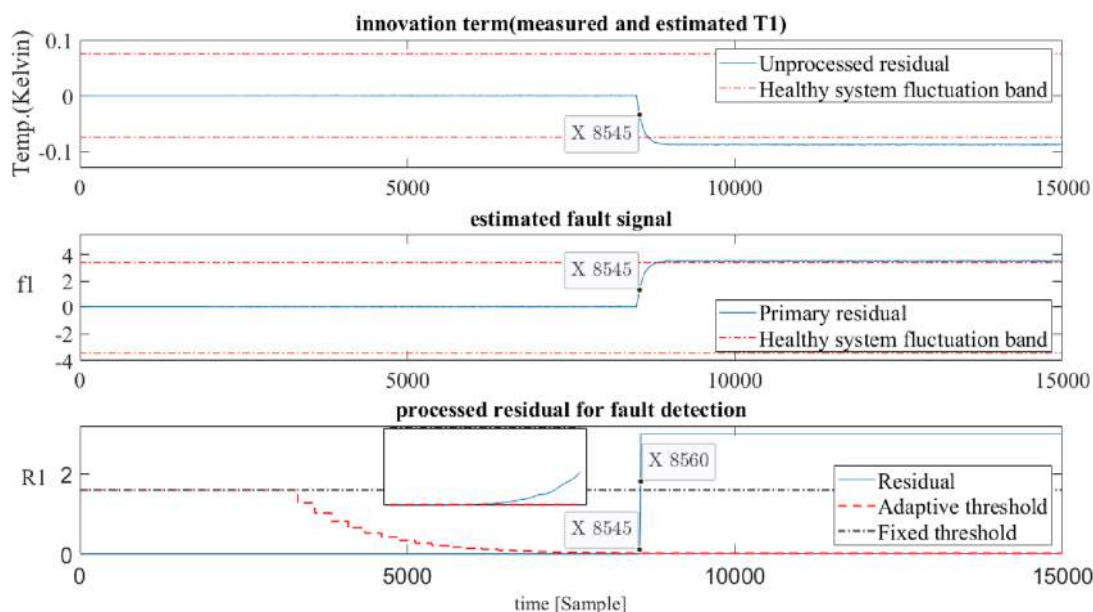
شکل ۷. شناسایی پارامترهای عیب تدریجی رسوب در سیستم انتقال حرارت رآکتور شماره یک و پیش بینی رفتار عیب



شکل ۸. شناسایی پارامترهای عیوب تدریجی رسوب در سیستم انتقال حرارت رآکتور شماره دو و پیش‌بینی رفتار عیوب

با توجه به اینکه روش پیشنهادی این مقاله بصورت برخط می‌باشد، در هر گام از اجرای برنامه و بر اساس داده‌های نمونه برداری، تخمین و تشخیص عیوب به صورت همگام انجام می‌شود. سپس، مطابق مطالب بیان شده در بخش ۶، برای پیش‌بینی روند رشد عیوب، به محض اعلام رخداد عیوب، با استفاده از داده‌های قبل از زمان تشخیص در یک محدوده مشخص و منطقی، مدلی برای رفتار عیوب در این بازه برآورد می‌شود که پس از زمان رخداد عیوب برای پیش‌بینی رفتار عیوب از آن استفاده می‌شود و به صورت همگام نیز این مدل بروزرسانی می‌شود. همانطور که در شکل ۷ و شکل ۸ مشاهده می‌شود، همگرایی در فرآیند شناسایی رفتار عیوب، به ترتیب پس از ۵۱ و ۷۲ گام از زمان رخداد واقعی آن‌ها، به دست آمده که با توجه به دامنه کوچک در نظر گرفته شده برای عیوب تدریجی تحت شبیه‌سازی، زمان مناسبی است [۱۷].

شبیه‌سازی‌های انجام شده در شرایط حداکثر حضور نویز در سیستم است و در شرایط عدم حضور نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری که انرژی سیگنال مانده برای عبور سریع از حد آستانه به اندازه کافی بالا نیست، می‌بایست بررسی لازم انجام شود. لذا، با کاهش محسوس اثر نویز بر سیستم و شبیه‌سازی مربوطه، نتایج برای عیوب تدریجی در رآکتور شماره یک، در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. عیب تدریجی رسوب در سیستم انتقال حرارت رآکتور شماره یک در شرایط کاهش نویز

مطابق با شکل ۹، به دلیل کاهش انرژی ناشی از عدم حضور نامعینی‌های سیستم در سیگنال مانده، این سیگنال قادر به عبور به موقع از سطح آستانه ثابت نیست ولی پس از عبور از سطح آستانه متغیر، تشخیص عیب به واسطه روش ارزیابی پیشنهادی صورت می‌پذیرد.

با توجه به مقادیر $Z_{1,2}$ در جدول ۲، سیگنال مانده مربوط به عیب تدریجی f_1 پس از ۳۸ گام از زمان رخداد واقعی عیب از حد آستانه متغیر عبور نموده و بواسطه سیستم ارزیابی، در گام ۴۵ عیب مربوطه تشخیص داده شده است. نکته قابل توجه در این نمودار، زمان عبور از حد آستانه ثابت است که ۶۰ گام از زمان رخداد، برای عیب تدریجی فوق‌الذکر بوده است. تاخیر بین زمان شناسایی بواسطه حد آستانه ثابت و حد آستانه متغیر در شرایط عدم حضور نویز، بیانگر عملکرد کارآمد حد آستانه متغیر در این رویکرد است به‌طور قابل ملاحظه‌ای از این تاخیر جلوگیری می‌کند.

برای ارزیابی کمی رویکرد پیشنهادی، مقدار بهینه تکرار مورد نیاز با بهره‌گیری از روش بیان شده در [۲۹] محاسبه و با استفاده از ۱,۰۰۰,۰۰۰ نمونه از سیگنال‌های عیب تحت پایش در شرایط بدون عیب سیستم، تعداد شبیه‌سازی مورد نیاز، به میزان ۷۰۰ تکرار محاسبه شده است. بعنوان یک نتیجه‌گیری کلی از این ارزیابی، زمان تشخیص دو سیگنال عیب بصورت میانگین به ترتیب در گام ۸/۸۵۴۹ و ۶/۹۵۴۹ می‌باشد که در حدود استاندارد تعریف شده در [۱۷] است. همچنین، میانگین زمان اجرای شبیه‌سازی به ازای هر تکرار مشتمل بر ۱۵,۰۰۰ گام بر اساس زمان نمونه‌برداری، ۶/۶ ثانیه محاسبه شده است. علاوه بر آن، ماتریس اختلاط و برخی از شاخص‌های ارزیابی کمی مرتبط، در جدول ۳ و جدول ۴ به این منظور ارائه شده است.

جدول ۳. ماتریس اختلاط رویکرد تشخیص عیب تدریجی

	واقعییت پیش بینی	مثبت (Positive)	منفی (Negative)
صحيح (True)		TD = ۱۳۹۸	FA = ۱۶۱۴
غلط (False)		FD = ۲	MD = ۰
TD: تشخیص صحیح، FA: هشدار کاذب، FD: تشخیص کاذب، MD: تشخیص از دست رفته			

جدول ۴. شاخص‌های ارزیابی کمی رویکرد تشخیص عیب تدریجی

شاخص	TPR	TNR	PPV	NPV	FNR	FPR	FDR	ACC	F1-Score
نتیجه	٪۱۰۰	۹۹/۸۸٪	۹۹/۸۶٪	٪۱۰۰	۰/۰۰٪	۰/۱۲٪	۰/۱۴٪	۹۹/۹۳٪	۹۹/۹۳٪
TPR: نرخ مثبت صحیح (حساسیت)، TNR: نرخ منفی صحیح (ویژگی)، PPV: پیش‌بینی مثبت (دقت)، NPV: پیش‌بینی منفی FNR: نرخ منفی کاذب (نرخ گم‌شدن سیگنال)، FPR: نرخ مثبت کاذب (خطا)، FDR: نرخ کشف کاذب، ACC: دقت (صحت)، F1-Score: میانگین توافقی دقت و حساسیت									

همانطور که از اطلاعات ارزیابی جدول ۳ قابل برداشت است، تشخیص همزمان دو عیب بصورت کامل صورت پذیرفته که بیانگر عملکرد مناسب روش پیشنهادی در تشخیص عیب است. علاوه بر آن، با توجه به تعداد FA نسبت به کل تست‌های انجام شده، توانایی روش ارزیابی پیشنهادی در شناسایی هشدارهای کاذب مشاهده می‌شود.

بر اساس جدول ۴، نتیجه شاخص صحت این روش ۹۹/۹۳٪ و امتیاز اف-وان نیز ۹۹/۹۳٪ است. همچنین نتیجه شاخص‌های حساسیت، ویژگی و دقت به ترتیب ٪۱۰۰، ۹۹/۸۸٪ و ۹۹/۸۶٪ می‌باشد که نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی در تشخیص عیوب تدریجی است.

به منظور بهبود رویکرد پیشنهادی، ارائه روشی جایگزین برای روش شناسایی GNM است که بر پایه مشتقات جزئی مدل غیرخطی بوده و در شرایط نویزی، بنحوی باعث تقویت آن‌ها شده و همگرایی را دچار مشکل می‌کند. همچنین، پارامتر β فیلتر مربوط به سیگنال عیب ورودی به واحد شناسایی پارامترها (ϕ)، بر اساس روش‌های تجربی با مصالحه بین معیار میزان همگرایی و زمان شناسایی انتخاب شده است. روشی جایگزین در تعیین مقدار بهینه این پارامتر، امکان بهینه‌سازی زمان شناسایی را فراهم می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ضمن بیان اهمیت تشخیص عیب تدریجی در عموم سیستم‌ها، بررسی این موضوع در سیستم‌های پیچیده غیرخطی حلقه‌بسته در محیط نویزی در شرایط حضور همزمان نویزهای گوسی و غیرگوسی صورت گرفته است. ارزیابی این رویکرد،

بر پایه تخمین بردار حالت سیستم با استفاده از ابزار قدرتمند فیلتر ذرات و تخمین عیب صورت گرفت. سپس، با استفاده از ویژگی آماری، با کاهش سطح سیگنال‌های مزاحم در مانده اولیه، قابلیت تشخیص عیب تدریجی فراهم آمد. برای ارزیابی مانده، حد آستانه ثابت و حد آستانه متغیر تشخیص عیب برای در نظر گرفتن تمامی شرایط نامعینی‌ها تعیین گردید. سپس در حضور نامعینی‌ها با استفاده از یک روش محافظه کارانه ارزیابی مانده متغیر، از تشخیص کاذب جلوگیری شده است. در شرایط نامعینی محدود و کاهش انرژی سیگنال مانده برای تحریک حد آستانه ثابت نیز، با عبور از حد آستانه متغیر، تشخیص عیب صورت پذیرفت.

پس از صدور هشدار تشخیص عیب، پارامترهای مدل عیب شناسایی شده و رفتار آتی عیب نیز پیش‌بینی گردید. با توجه به غیرخطی بودن سیستم و نامعینی‌های گسترده، از تکنیک میانگین متحرک نمایی وزنی برای نوینزدایی از تخمین عیب و همگرایی شناسایی پارامترهای مدل عیب به روش گوس-نیوتن، با حفظ مصالحه بین تاخیر در شناسایی و همگرایی، در این مقاله استفاده شد. به منظور بررسی اثربخشی این رویکرد، با شبیه‌سازی سیستم صنعتی CSTR، تشخیص عیوب تدریجی رسوب در سیستم انتقال حرارت راکتورها، بررسی شد و علیرغم دامنه بسیار کوچک عیوب تدریجی نسبت به مقادیر بردار حالت سیستم، نتایج مربوطه عملکرد مناسب این رویکرد را تصدیق نمود. برای ارزیابی کمی نتایج شبیه‌سازی، با تشکیل ماتریس اختلاط، شاخص مرتبط محاسبه گردید.

مراجع

- [1] H. Chen, B. Jiang, N. Lu, and Z. Mao, "Deep PCA based real-time incipient fault detection and diagnosis methodology for electrical drive in high-speed trains," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 6, pp. 4819-4830, 2018.
- [2] H. Safaeipour, M. Forouzanfar, and A. Casavola, "A survey and classification of incipient fault diagnosis approaches," *Journal of Process Control*, vol. 97, pp. 1-16, 2021.
- [3] D. Zhao, Q. Zhu, and J. Dubbeldam, "Terminal sliding mode control for continuous stirred tank reactor," *Chemical engineering research and design*, vol. 94, pp. 266-274, 2015.
- [4] I. Aljamaan, D. Westwick, and M. Foley, "Non-linear closed-loop identification of CSTR in the presence of a non-stationary disturbances," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 28, pp. 1029-1034, 2015.
- [5] P. Cai and X. Deng, "Incipient fault detection for nonlinear processes based on dynamic multi-block probability related kernel principal component analysis," *ISA transactions*, vol. 105, pp. 210-220, 2020.
- [6] B. Jiang, M. Staroswiecki, and V. Cocquempot, "Fault accommodation for nonlinear dynamic systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 51, no. 9, pp. 1578-1583, 2006.
- [7] A. Armaou and M. A. Demetriou, "Robust detection and accommodation of incipient component and actuator faults in nonlinear distributed processes," *AIChE journal*, vol. 54, no. 10, pp. 2651-2662, 2008.
- [8] Y. Wu, B. Jiang, N. Lu, H. Yang, and Y. Zhou, "Multiple incipient sensor faults diagnosis with application to high-speed railway traction devices," *ISA transactions*, vol. 67, pp. 183-192, 2017.
- [9] M. Liu and P. Shi, "Sensor fault estimation and tolerant control for Itô stochastic systems with a descriptor sliding mode approach," *Automatica*, vol. 49, no. 5, pp. 1242-1250, 2013.
- [10] M. J. Khosrowjerdi and S. Barzegary, "Fault tolerant control using virtual actuator for continuous-time Lipschitz nonlinear systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 24, no. 16, pp. 2597-2607, 2014.
- [11] X. Zhang, M. M. Polycarpou, and T. Parisini, "A robust detection and isolation scheme for abrupt and incipient faults in nonlinear systems," *IEEE transactions on automatic control*, vol. 47, no. 4, pp. 576-593, 2002.
- [12] J. Lan and R. J. Patton, "Integrated fault estimation and fault-tolerant control for uncertain Lipschitz nonlinear systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 27, no. 5, pp. 761-

- 780, 2017.
- [13] D.-H. Zhou and P. Frank, "Fault diagnostics and fault tolerant control," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 34, no. 2, pp. 420-427, 1998.
- [14] X. Liu and Z. Gao, "Integrated fault estimation and fault-tolerant control for stochastic systems with Brownian motions," International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 28, no. 6, pp. 1915-1941, 2018.
- [15] D. Jiang, W. Li, F. Shen, and T. Xu, "Particle Filtering for Fault Diagnosis in Nonlinear Plants Based on Adaptive Threshold Method," in 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), 2018: IEEE, pp. 5997-6004.
- [16] B. Ding and H. Fang, "Multi-faults detection and estimation for nonlinear stochastic system based on particle filter and hypothesis test," International Journal of Systems Science, vol. 47, no. 16, pp. 3812-3821, 2016.
- [17] B. Ding and H. Fang, "Fault prediction for nonlinear stochastic system with incipient faults based on particle filter and nonlinear regression," ISA transactions, vol. 68, pp. 327-334, 2017.
- [۱۸] م. خسروجردی، "روش های تشخیص و جبران سازی عیب در سیستم های کنترل"، صفحه ۵۲-۵۶، انتشارات دانشگاه صنعتی سهند، چاپ اول ۱۳۹۵.
- [19] C. Zhao, X. Chen, L. Lu, S. Zhang, and Y. Sun, "Incipient fault detection and variable isolation based on subspace decomposition and distribution dissimilarity analysis," in Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS), 2017 6th, 2017: IEEE, pp. 48-53.
- [20] B. Illowsky and S. Dean, "Introductory statistics," 2018.
- [21] S. X. Ding, Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools. Springer Science & Business Media, 2008.
- [22] M. Nakano, A. Takahashi, and S. Takahashi, "Generalized exponential moving average (EMA) model with particle filtering and anomaly detection," Expert Systems with Applications, vol. 73, pp. 187-200, 2017.
- [23] H. Ji, X. He, J. Shang, and D. Zhou, "Incipient fault detection with smoothing techniques in statistical process monitoring," Control Engineering Practice, vol. 62, pp. 11-21, 2017.
- [24] M. Kheradmandi and P. Mhaskar, "Prescribing closed-loop behavior using nonlinear model predictive control," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 56, no. 51, pp. 15083-15093, 2017.
- [25] J. Liu, D. M. de la Peña, B. J. Ofran, P. D. Christofides, and J. F. Davis, "A two-tier architecture for networked process control," Chemical Engineering Science, vol. 63, no. 22, pp. 5394-5409, 2008.
- [26] J. D. S. Torres, H. A. Botero, E. Jiménez, O. Jaramillo, and A. G. Loukianov, "A robust extended state observer for the estimation of concentration and kinetics in a CSTR," International Journal of Chemical Reactor Engineering, vol. 14, no. 1, pp. 481-490, 2016.
- [27] L. Schnöing, W. Augustin, and S. Scholl, "Thermal ageing of proteinaceous fouling layers during the growth phase," Heat and Mass Transfer, pp. 1-9, 2020.
- [28] M. Ghorbani and R. Maddahian, "Investigation of asphaltene particles size and distribution on fouling rate in the crude oil preheat train," Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 196, p. 107665, 2021.
- [29] W. L. Winston, Simulation modeling using @RISK. Wadsworth Publ. Co., 1996.