آشکارسازی عیوب تدریجی همزمان گرفتگی مسیر سیال و نشتی در مخازن صنعتی به‌هم‌پیوسته

حسین صفایی پور[۱]، مهدی فروزانفر*[۲]، امین رمضانی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، h.safaeipour@iauahvaz.ac.ir
*۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، m.forouzanfar@iauahvaz.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران ramezani@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

چکیده: در فرآیندهای صنعتی حلقه-بسته دارای مخازن به‌هم‌پیوسته با رفتار دینامیکی غیرخطی تحت اغتشاشات تصادفی توأم گوسی و غیرگوسی، آشکارسازی به‌موقع عیوب تدریجی همزمان، اهمیت بالایی دارد. بدین منظور، در این مقاله یک روش آشکارسازی برای عیوب تدریجی در این سیستم‌ها، ارائه شده است. در این روش، ابتدا با استفاده از مدل سیستم، مدل معلوم کنترل‌کننده و اندازه‌گیری‌ها و با فرض کلیه نامعینی‌ها در بردار عیب تدریجی، تخمین بردار حالت سیستم انجام شده است. سپس، سیگنال مانده با استفاده از تفاضل بردار خروجی اندازه‌گیری شده و تخمین آن، تولید می‌شود. پس از آن، با تمرکز بر پردازش مانده تولید شده بواسطه ویژگی‌های آماری آن از جمله پنجره متحرک و خودهمبستگی، سیگنال مانده مناسب تحلیل تولید شده است. برای ارزیابی این مانده، حد آستانه متغیر و ثابت طراحی شده و در نهایت با ارزیابی هشدارهای دریافت شده بواسطه عبور سیگنال مانده از حد آستانه متغیر و یا تشخیص قطعی عبور از حد آستانه ثابت، برای تشخیص عیب تدریجی راهکار ارائه شد. در پایان به منظور ارزیابی این رویکرد، شبیه‌سازی آشکارسازی عیوب تدریجی همزمان نشتی مخازن و گرفتگی مسیر سیال در سیستم غیرخطی سه‌تانک به‌هم‌پیوسته DTS200، انجام شده است. برای ارزیابی کمی نتایج شبیه‌سازی، ماتریس اختلاط تشکیل و شاخص‌های ارزیابی مرتبط و امتیاز اف-وان محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی عیب تدریجی، خودهمبستگی، غیرخطی، غیرگوسی، مبتنی بر مدل.

۱- مقدمه

عیوب تدریجی آن دسته از عیوبی هستند که به تدریج و با سرعت غالباً کم در سیستم ظاهر می‌گردند [۱] و در صورت عدم وجود سیستم پایش آشکارسازی این عیوب، تا زمان تبدیل به عیبی بزرگتر قابل تشخیص نبوده و به سیستم آسیب وارد می‌نماید [۲] و حتی در صورت عدم تبدیل به عیبی قابل آشکارسازی، در بدنه سیستم باقی مانده و به تناسب محل، نوع و اندازه، ضمن ایجاد خسارت‌های مالی ناشی از کاهش بازده، خروجی‌های سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۳, ۴]. عیوب تدریجی دارای دامنه کمتر از ۱۰٪ دامنه سیگنال اصلی با نرخ رشد پایین در مقادیر پارامترهای سیستم بوده و بواسطه دینامیک بسیار کند، به راحتی توسط نامعینی‌های سیستم مخفی می‌شوند [۵]. این مسئله در سیستم‌های حلقه-بسته به دلیل عملکرد حلقه فیدبک و قوام ناشی از آن، به مراتب برجسته‌تر می‌باشد [۶]. همچنین، غیرخطی بودن سیستم و حضور نامعینی‌های تصادفی، آشکارسازی این عیوب را دشوارتر می‌نماید [۷].

یکی از سیستم‌های پرکاربرد در فرآیندهای صنعتی نظیر پتروشیمی، نفت و تولید فرآورده‌های شیمیایی، سیستم غیرخطی سه‌تانک به‌هم‌پیوسته DTS200 تحت کنترل حلقه-بسته می‌باشد که آلوده به نامعینی‌هایی با توزیع گوسی و غیرگوسی است که نیاز به پایش عیوب تدریجی در بخش‌های مختلف آن احساس می‌شود. با توجه به اینکه کلاس دقت تجهیزات پایش عیوب عموماً پایین بوده و تنظیمات

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.1.2.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power – Vol 11, No. 1, Spring 2022

حفاظتی صرفاً برای آشکارسازی عیوب ناگهانی کاربرد دارد، در صنعت قابلیت آشکارسازی 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 در ورودی آب نیروگاه هسته‌ای، بطور میانگین باعث کاهش ۱ تا ۲ درصدی توان نیروگاه شد [۸]. از این رو استفاده از یک روش آشکارسازی و تفکیک عیب (FDI) با در نظر گرفتن شرایط واقعی سیستم‌های صنعتی می‌تواند از چنین عیوبی جلوگیری نماید [۹].

در روش‌های آشکارسازی عیب تدریجی (IFD) برای سیستم‌های حلقه-بسته، بدون در نظر گرفتن نامعینی، با فرض محدود کننده قابل تفکیک بودن سیستم به زیرسیستم‌های سریع و کند با ابعاد متفاوت، بدون در نظر گرفتن غیرخطی‌های مدل نشده در [۱۰, ۱۱] یا با اعمال محدودیت بر بخش‌های مختلف سیستم از جمله بخش فیدبک در [۱۲] انجام شده است. در رویکردی دیگر، با در نظر گرفتن اغتشاش محدود فرآیند یا عدم قطعیت مدل و اعمال محدودیت در بخش غیرخطی، IFD در حسگر و عملگر ارائه شده است [۱۳, ۱۴]. علاوه بر آن، IFD با در نظر گرفتن نامعینی غیرساختار یافته غیرخطی و با فرض در دسترس بودن تمامی حالت‌ها [۱۵] و با شرط کنترل پذیری، رویت‌پذیری بخش خطی سیستم، لیپشیتز بودن بخش غیرخطی و هم‌رتبه بودن ماتریس ورودی‌های سیستم با ماتریس مشخصات عیب، بررسی شده است [۱۶]. در تمام این روش‌ها، بدلیل عدم در نظر گرفتن نویز و شروط محدودیت کننده، استفاده عملی آن‌ها در سیستم‌های صنعتی با چالش جدی مواجه خواهد شد.

در سیستمی دیگر، برای IFD بایاس حسگر با استفاده از الگوریتم تخمین شبه تفکیک بایاس با در نظر گرفتن نویز با توزیع گوسی، با استفاده از تعریف مشتق، روشی با کاربرد محدود پیشنهاد گردید [۱۷]. همچنین، در یک سیستم حلقه-بسته چند مدلی تحت نامعینی‌های تصادفی، با استفاده از فیلتر ذرات (PF)، IFD انجام شده است. لیکن، شرط معلوم بودن مدل کنترل‌کننده، معلوم بودن عیب و حجم محاسبات این روش، از جمله محدودیت‌های آن است و ماتریس انتقال مدل‌ها نیز خطی فرض گردید [۱۸].

با توجه به موارد فوق، نیاز به ارائه یک روش عمومی ساختار یافته به منظور آشکارسازی عیوب تدریجی همزمان در سیستم‌های غیرخطی حلقه-بسته در حضور نویزهای توأم گوسی و غیرگوسی ضروری است. بنابراین، در این مقاله به مسئله آشکارسازی عیوب تدریجی همزمان در سیستم‌های صنعتی دارای سه تانک به‌هم‌پیوسته 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، نشتی در بدنه تانک و گرفتگی تدریجی در نظر گرفته شده است.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم، ابتدا رویکردی برای آشکارسازی عیوب تدریجی همزمان مبتنی بر مدل در سیستم‌های غیرخطی حلقه-بسته تحت نویزهای گوسی و غیرگوسی، ارائه شده است. پس از آن، در بخش سوم، صورت مسئله آشکارسازی عیب تدریجی سیستم غیرخطی سه‌تانک به‌هم‌پیوسته DTS200 در قالب روش پیشنهادی تدوین شده است. در بخش چهارم به شبیه سازی و ارزیابی کمی روش پیشنهادی به منظور آشکارسازی عیوب تدریجی همزمان در حضور توأم نویزهای گوسی و غیرگوسی برای سیستم سه‌تانک، پرداخته شده و در انتها، بخش پنجم به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲- صورت مسئله و رویکرد حل

مدل سیستم غیرخطی گسسته حلقه-بسته به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$\Sigma_1:\begin{cases} x_{k+1} = g(x_k, u_k) + \Gamma(x_k) f_k + w_k \\ y_k = C_k x_k + v_k \\ u_k = \phi(x_k, y_k, u_{ref_k}) \end{cases} \quad (۱)$$

که در آن $x_k \in \mathbb{R}^n$ و $y_k \in \mathbb{R}^p$ بردارهای حالت و خروجی سیستم، $f_k \in \mathbb{R}^m$ بردار عیب (تدریجی نمایی)، $g(\cdot)$ تابع غیرخطی سیستم، $C_k \in \mathbb{R}^{p\times n}$ ماتریس اندازه‌گیری (خروجی)، u_{ref} و $\phi(\cdot)$ به ترتیب بردار سیگنال مرجع و قانون کنترل فیدبک غیرخطی، $u_k \in \mathbb{R}^q$ بردار ورودی سیستم، $w_k \in \mathbb{R}^n$ و $v_k \in \mathbb{R}^p$ نیز به ترتیب بردار نویز فرآیند غیرگوسی و نویز اندازه‌گیری گوسی با مشخصات آماری معلوم هستند. $\Gamma(x_k) \in \mathbb{R}^{n\times m}$ ماتریس تابع توزیع عیب است. در رابطه (۱) عیب تدریجی $f_{i,k}$ بصورت رابطه (۲) تعریف می‌شود [۱۹]؛

$$f_{i,k} = \begin{cases} 0, & 0 \le k < \theta_{2,i} \\ \alpha_i\left(1 - e^{-\theta_{1,i}(k-\theta_{2,i})}\right) + w_{i,k}^f & \theta_{2,i} \le k \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن $\theta_{1,i} > 0$ یک ضریب نامعلوم بوده و بیانگر نرخ رشد عیب در بردار حالت x_i و $\theta_{2,i}$ بیانگر زمان رخداد i-امین عیب و α_i بیان‌گر بیشینه دامنه i-امین جزء از بردار 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 – فرض‌های مسئله

فرض ۱: سیستم غیرخطی شرط لیپشیتز را برآورده می‌کند [۲۰].

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

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

فرض ۴: برای تعیین حد آستانه آشکارسازی عیب، سیستم سالم و در شرایط حالت دائم در نظر گرفته شده است.

۲- ۲ – آشکارسازی، عیب تدریجی

برای حل مسئله، با فرض وجود یک مدل نسبتاً دقیق از کنترل‌کننده و امکان تخمین بردار ورودی کنترلی بر اساس این مدل، با تمرکز بر نحوه تولید و تحلیل مانده، بواسطه ویژگی‌های آماری سیگنال مانده

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.1.2.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power – Vol 11, No. 1, Spring 2022

آشکارسازی عیب صورت می‌گیرد. یکی از اهداف این رویکرد نیز، آشکارسازی برخط عیوب تدریجی همزمان بر پایه توابع ریاضی ساده و تلاش محاسباتی بسیار کم بوده است. بدلیل فرض حضور همزمان نامعینی‌های گوسی و غیرگوسی در مدل، برای جلوگیری از آشکارسازی اشتباه و یا تاخیر در آشکارسازی عیب، حد آستانه متغیر بر اساس شرایط نامعینی سیستم طراحی و معرفی شده است.

برای سیستم حلقه-بسته غیرخطی (۱) با در نظر گرفتن فرض ۱ الی ۴، مراحل کلی الگوریتم حل مسئله در ادامه در سه بخش مجزا ۱. تخمین بردار حالت $\hat{x}_k$ و تخمین بردار عیب، ۲. تعیین سیگنال مانده، ۳. تعیین حد آستانه آشکارسازی عیب و ارزیابی مانده تشریح شده است.

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

بر اساس مدل سیستم گسسته (۱)، مدل تخمین‌گر مطابق با رابطه (۳) در نظر گرفته شده است؛

$$\Sigma_2: \begin{cases} \hat{x}_{k+1} = g(\hat{x}_k, \hat{u}_k) \\ \hat{y}_k = C_k \hat{x}_k \\ \hat{u}_k = \phi(\hat{x}_k, \hat{y}_k, y_r) \end{cases} \quad (۳)$$

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 $\hat{u}_k \in \mathbb{R}^q$ تخمین بردار ورودی کنترلی می‌باشند. سیگنال‌های مورد استفاده در تولید مانده می‌بایست علاوه بر منطقی بودن سطح اعوجاج سیگنال، تحت اثرات حداکثری عیوب تدریجی نیز باشند. در این راستا، همانطور که در [۲۱] ذکر شده است، اثر عیوب تدریجی در زمان‌های اولیه در تحریف ساختار ماتریس کواریانس نهفته است. بنابراین، ایده اصلی حل مسئله استفاده از ویژگی آماری برای تشکیل سیگنال مانده است و در ادامه نحوه تولید سیگنال مانده و حد آستانه آشکارسازی عیب بیان خواهد شد.

۲ - ۲ - ۲ - تعیین سیگنال مانده

با استفاده از تفاضل بردار خروجی اندازه‌گیری شده و تخمین آن که مطابق با رابطه (۳)، یک سیگنال ایده‌آل است که توسط مدل سیستم تولید شده و عاری از هرگونه نامعینی از جمله نویز و عیب است، مانده اولیه قابل محاسبه است. از طرف دیگر، نویز اندازه‌گیری، نویز فرآیند، عدم قطعیت و عیوب تدریجی بر سیگنال‌های اندازه‌گیری شده اثر گذارند. از این رو، با استفاده از تشکیل یک پنجره از سیگنال مانده به فرم رابطه (۴) بخشی از اعوجاج‌های موجود در این سیگنال کنترل می‌شود.

$$\tilde{y}_{n,k} = \sum_{j=k-n-1}^{k-1} (y_j - \hat{y}_j) \quad (۴)$$

که در آن n طول پنجره مذکور را تعیین می‌کند و مقدار آن با توجه به زمان مجاز آشکارسازی عیب تعیین می‌شود [۱۸]. با استفاده از روابط (۱) و (۳)، رابطه (۴) به فرم رابطه (۵) بیان می‌شود؛

$$\tilde{y}_{n,k} = \sum_{j=k-n-1}^{k-1} C_j (x_{j+1} - \hat{x}_j) + v_j \quad (۵)$$

و با جایگذاری متغیرها؛

$$\tilde{y}_{n,k} = \sum_{j=k-n-1}^{k-1} C_j \left(g(x_{j+1}, u_j, f_j) + w_j - g(\hat{x}_j, \hat{u}_j) \right) + v_j \quad (۶)$$

با توجه به اینکه میانگین و واریانس نویز مشخص است؛

$$\tilde{y}_{n,k} = \sum_{j=k-n-1}^{k-1} C_j (\eta_j + F_j + w_j) + v_j \quad (۷)$$

که در آن F تابعی از f_k بیانگر عیب تدریجی سیستم است و η نیز بیانگر خطای تخمین در نظر گرفته شده است. برای راحتی در محاسبات و رفع اشکال نیاز به دقیق بودن مدل تخمینگر، از این پس η بخشی از بردار عیب در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است در شرایط سیستم بدون عیب، بردار عیب صرفاً بیانگر نامعینی‌های سیستم است که در خطای تخمین برآورد می‌شوند.

اگرچه، با استفاده از رابطه (۴) سیگنال مانده $\tilde{y}_{n,k}$ ساخته شده است، با توجه به غیرخطی بودن سیستم با در نظر گرفتن جمله‌های تصادفی، نمی‌توان از آن مستقیماً برای آشکارسازی عیب استفاده کرد. بنابراین، یک سیگنال قابل اطمینان با نوسانات قابل قبول باید به عنوان سیگنال مانده نهایی انتخاب شود.

ایده استفاده شده در این رویکرد، به کارگیری ویژگی خودهمبستگی بر مانده اولیه در رابطه (۴) است؛

$$R_{\tilde{y}\tilde{y}_{n,k}} = \sum_{j=k-l-1}^{k-1} \tilde{y}_{n,j} \tilde{y}_{n,j-m} \quad (۸)$$

که در آن $R_{\tilde{y}\tilde{y}}$ سیگنال مانده منتخب برای آشکارسازی عیب است که خودهمبستگی سیگنال $\tilde{y}$ را نشان می‌دهد [۲۲]. همچنین، مشابه تعریفی که برای n گردید، پارامتر l طول پنجره‌ای از نمونه‌های سیگنال $\tilde{y}$ است و $m < l$ با توجه به مشخصات تابع عیب تدریجی و نامعینی های سیستم و زمان مجاز آشکارسازی عیب با توجه به مقدار تعیین شده برای n، تعیین می‌شود.

بعنوان روشی برای انتخاب مقادیر l و m، بر اساس اصول تجزیه موجک، $l = 2^\tau$ و $m = 2^d$ و $d < \tau \in \mathbb{N}$ بعنوان روابط تعیین این مقادیر انتخاب شده‌اند [۲۳]. اگرچه مقادیر دقیق این پارامترها بر اساس مشخصات سیستم و نوع عیب می‌بایست انتخاب گردند. ذکر این نکته ضروری است که در تعیین مقدار l، زمان مجاز تاخیر در آشکارسازی عیب، قید اصلی و تعیین کننده است که توسط طراح سیستم حول مقادیر پیش فرض، تنظیم می‌شود.

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

نامعینی‌های تعریف شده در مدل، شامل نویز غیرگوسی فرآیند، نویز گوسی اندازه‌گیری و خطای مدل، بدون هیچگونه تعدیلی در بردار مانده اولیه ظاهر می‌شوند. اثر این نامعینی‌ها، در رابطه (۴) تعدیل شده و در رابطه (۸) بواسطه ویژگی خودهمبستگی، بردار مانده دارای کمترین وابستگی به این نامعینی‌ها، بدست می‌آید. برای تعیین حد آستانه آشکارسازی عیب، بر اساس این بردار مانده، ابتدا بررسی قابلیت آشکارسازی عیب بواسطه اثبات وجود مقادیر حد آستانه متغیر و نحوه تعیین آن صورت گرفته است [۲۴]. پس از آن روش محاسبه حد

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.1.2.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power – Vol 11, No. 1, Spring 2022

آستانه ثابت و نحوه ارزیابی هشدارهای دریافت شده بواسطه عبور سیگنال مانده از حد آستانه متغیر، معرفی شده است. بدیهی است در هر مرحله‌ای، در صورت عبور هر یکی از مولفه‌های بردار مانده از حد آستانه ثابت، آشکارسازی قطعی عیب تدریجی صورت می‌پذیرد.

قضیه ۱ :

برای یک سیگنال مانده به فرم رابطه (۸) با فرض $F_j = 0$، $v_j = 0$ و $w_j = 0$ در رابطه (۴) به ازای هر $j < k-1$، آنگاه، وجود دارد (δ_1 و Δ_1) به نحوی‌که $\Delta_1 < \delta_1$ و $R_{\tilde{y}\tilde{y}_{n,k}} < \delta_1$، اگر:

$$\left\|\tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)}\right\|_\infty < \Delta_1 \;\&\; \left\|\tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)}\right\|_\infty < \Delta_1$$

اثبات ۱ :

در رابطه (۴)، با فرض $-\mu_1 < \tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)} < \mu_1$ و $-\mu_2 < \tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)} < \mu_2$ بدست می‌آید:

$$\left|\tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)}\right| < \mu_1 \;\rightarrow\; \sup_k \tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)} < \mu_1$$

و بطور مشابه

$$\left|\tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)}\right| < \mu_2 \;\rightarrow\; \sup_k \tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)} < \mu_2$$

و بر همین اساس، اگر و فقط اگر $\mu_1 \;\&\; \mu_2 < \Delta_1$ اثبات می‌شود.

قضیه ۲ :

برای یک سیگنال مانده به فرم رابطه (۸) با فرض $F_j = 0$، $v_j = 0$ و $w_j = 0$ در رابطه (۴) به ازای هر $j < k-1$ همچنین با فرض $F_j \neq 0$ به ازای هر $j \geq k-1$ آنگاه، وجود دارد (δ_2، Δ_2 و حد آستانه τ_{ar}) به نحوی‌که $\Delta_1 < \Delta_2$، $\delta_1 < \delta_2$ و $R_{\tilde{y}\tilde{y}_{n,k}} < \delta_2$، اگر:

$$\left\|\tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)}\right\|_\infty < \Delta_1 \;\&\; \left\|\tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)}\right\|_\infty < \Delta_2$$

در نتیجه عیب تدریجی به ازای $\tau_{ar} < \delta_2$ قابل آشکارسازی است.

اثبات ۲ :

با توجه به این اینکه عدم قطعیت‌ها (حتی با توزیع غیرگوسی) معمولاً دارای دامنه محدود و مشخصی هستند و در نقطه مقابل، روند رشد عیوب تدریجی حتی در مراحل اولیه تقریباً در یک جهت خاص حرکت می‌کند، در نتیجه همبستگی پنجره دارای عیب با پنجره فاقد عیب مقدار قابل تمایزی خواهد داشت. بنابراین، این ویژگی می‌تواند به شرح ذیل در مسئله آشکارسازی عیب تدریجی، در نظر گرفته شود.

با فرض $-\mu_3 < \tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)} < \Delta_1$ و $-\mu_3 < \tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)} < \mu_3$ بدست می‌آید:

$$\left|\tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)}\right| < \Delta_1 \rightarrow \sup_k \tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)} < \Delta_1$$

و بطور مشابه

$$\left|\tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)}\right| < \mu_3 \;\rightarrow\; \sup_k \tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)} < \mu_3$$

و بر همین اساس، اگر و فقط اگر $\Delta_1 < \mu_3 < \Delta_2$ قضیه ۲ اثبات می‌شود.

قضیه ۳ :

برای یک سیگنال مانده به فرم رابطه (۸) با فرض $v_j \neq 0, w_j \neq 0$ در رابطه (۴) به ازای هر j و با فرض $F_j \neq 0$ به ازای هر $j \geq k-1$ آنگاه، وجود دارد (δ_3، Δ_3، Δ_4 و حد آستانه τ_{ar}) به نحوی که $\Delta_4 > \Delta_3 > \Delta_2$، $\delta_3 > \delta_2 > \Delta_3$ و $\Delta_4 < \delta_3$، $R_{\tilde{y}\tilde{y}_{n,k}} < \delta_3$ اگر:

$$\left\|\tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)}\right\|_\infty < \Delta_3 \;\&\; \left\|\tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)}\right\|_\infty < \Delta_4$$

در نتیجه عیب تدریجی به ازای $\tau_{ar} < \delta_3$ قابل آشکارسازی است.

اثبات ۳ :

با توجه به اثبات ۱ و اثبات ۲:

با فرض $-\mu_4 < \tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)} < \mu_4$ و $-\mu_5 < \tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)} < \mu_5$ بدست می‌آید:

$$\left|\tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)}\right| < \mu_4 \;\rightarrow\; \sup_k \tilde{y}_{(k-m-l-1)\cdots(k-m-1)} < \mu_4$$

و بطور مشابه

$$\left|\tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)}\right| < \mu_5 \;\rightarrow\; \sup_k \tilde{y}_{(k-l-1)\cdots(k-1)} < \mu_5$$

و بر همین اساس، اگر و فقط اگر $\mu_4 < \Delta_3$ و $\mu_5 < \Delta_4$ قضیه ۳ اثبات می‌شود.

بدیهی است که در بازه زمانی مشخصی از عملکرد سیستم که کلیه شرایط کار آن را در نظر گرفته باشد، بیشینه مقدار مشاهده از هر سیگنال در شرایط سیستم بدون عیب، معیاری قطعی برای آشکارسازی عیب است. هرچند که ممکن است بدلیل نویزهای گوسی و غیرگوسی، این حد آستانه نسبت به بیشینه دامنه عیب تدریجی، مقادیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. برای محاسبه حد آستانه ثابت آشکارسازی عیب، با استفاده از روش مونت-کارلو و سیگنال مانده $R_{\tilde{y}\tilde{y}_i}$، بر اساس رابطه (۹) اقدام شده است [۱۹].

$$\gamma_{Fi} = \max_k |R_{\tilde{y}\tilde{y}_{i,n,k}}| \qquad (i = 1, \ldots, q) \qquad (۹)$$

که در آن مقدار γ_{Fi} در شرایط سیستم بدون عیب، به نامعینی‌های سیستم مرتبط است. در صورت وجود محدودیت و عدم امکان استفاده از رابطه (۹) در تعیین حد آستانه ثابت، جایگزین مناسب آن، استفاده از میانگین و واریانس داده‌های در دسترس از سیستم بدون عیب، به شرح رابطه (۱۰) است؛

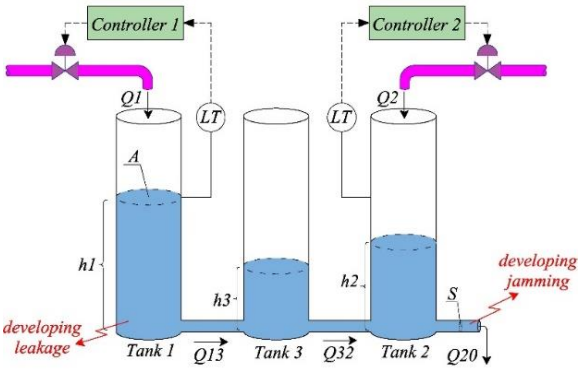
$$\gamma_{Fi} = \bar{X}_i \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{S_{x_i}} \qquad (۱۰)$$

که در آن $\bar{X}$ میانگین داده‌ها، $z_{\frac{\alpha}{2}}$ نمره استاندارد توزیع نرمال است که بر اساس سطح اطمینان توسط پارامتر α و بر اساس اعتبار و حجم داده‌ها، توسط طراح سیستم مشخص می‌گردد و S_x نیز واریانس داده‌ها می‌باشد. شایان ذکر است که در زمان عدم حضور نویز فرآیند و اندازه‌گیری و در نتیجه کاهش انرژی سیگنال مانده، ارزیابی بواسطه حد آستانه ثابت برای آشکارسازی عیب، تاخیر قابل توجهی در IFD به همراه دارد. لذا، استفاده از یک حد آستانه متغیر برای IFD، اجتناب‌ناپذیر است که از روش تعیین حد آستانه متغیر و ارزیابی مربوطه ارائه شده در [۲۴] استفاده شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.1.2.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power – Vol 11, No. 1, Spring 2022

۳- معرفی سیستم حلقه- بسته سه تانک به‌هم‌پیوسته DTS200

برای شبیه‌سازی روش آشکارسازی عیب تدریجی ارائه شده در این مقاله، سیستم غیرخطی صنعتی سه تانک به‌هم‌پیوسته DTS200 استفاده شده که در ادامه تشریح خواهد شد [۲۳, ۲۴]. شمای کلی این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: سیستم حلقه-بسته سه تانک به‌هم‌پیوسته DTS200 [۲۴]

در اکثر فرآیندهای صنعتی، مسدود شدن مسیر گردش و نشتی در مخازن فرآیند، ذخیره یا مخازن ته نشینی، مسائلی رایج هستند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مثال حاضر تحت دو عیب تدریجی قرار گرفته است، یکی به عنوان نشت در مخزن شماره یک، دیگری به عنوان گرفتگی تدریجی در خروجی فرآیند (مخزن شماره دو) [۱۹].

مطابق با رابطه (۱)، بردار حالت x_k در این رابطه $h_{i,k}$ نامگذاری شده است و مدل دینامیکی کلی سیستم حلقه- بسته سه تانک به‌هم‌پیوسته DTS200 بصورت رابطه (۱۱) بدست می‌آید [۲۴].

$$\Sigma_3:\begin{cases} h_{1,k+1} = h_{1,k} + \frac{T}{A}\left(u_{c1,k} - Q_{13,k}\right) \\ h_{2,k+1} = h_{2,k} + \frac{T}{A}\left(u_{c2,k} + Q_{32,k} - Q_{20,k}\right) \\ h_{3,k+1} = h_{3,k} + \frac{T}{A}\left(Q_{13,k} - Q_{32,k}\right) \end{cases} \quad (۱۱)$$

که در آن، T بازه زمانی نمونه‌برداری، A سطح مقطع تانک، h_i سطح تانک، $u_{ci,k}$ ورودی سیستم و Q_{ij} جریان سیال از تانک i به j است که از معادلات دینامیکی سیستم بدست می‌آید و به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌گردد؛

$$\Sigma_4:\begin{cases} Q_{13,k} = az_1 s * sgn\left(\bar{h}_{1,k} - \bar{h}_{3,k}\right)\sqrt{2g\left|\bar{h}_{1,k} - \bar{h}_{3,k}\right|} \\ Q_{32,k} = az_3 s * sgn\left(\bar{h}_{3,k} - \bar{h}_{2,k}\right)\sqrt{2g\left|\bar{h}_{3,k} - \bar{h}_{2,k}\right|} \\ Q_{20,k} = az_2 s\sqrt{2g\bar{h}_{2,k}} \end{cases} \quad (۱۲)$$

$$\Sigma_5:\begin{cases} \bar{h}_{1,k} = h_{1,k} + fault_{1,k} + w_{1,k} \\ \bar{h}_{2,k} = h_{2,k} + fault_{2,k} + w_{2,k} \\ \bar{h}_{3,k} = h_{3,k} + w_{3,k} \end{cases} \quad (۱۳)$$

که در آن $fault_{1,k}$ و $fault_{2,k}$ مولفه‌های بردار عیب سیستم هستند و در ادامه روابط آن بیان می‌شود، w_k بردار نویز فرآیند با کواریانس Q_k با توزیع غیرگوسی که به صورت رابطه (۱۴) تعریف شده است [۱۹].

$$w_i \sim N(0,\sigma^2) + U[-\sigma^2,\sigma^2], \quad (i = 1,2,3) \quad (۱۴)$$

که در آن $N(0,\sigma^2)$ توزیع گوسی با میانگین 0 و واریانس σ^2، $U[-\sigma^2,\sigma^2]$ توزیع یکنواخت از $-\sigma$ تا σ، می‌باشد.

در این روابط، بر اساس رابطه (۱)، $u_k = \emptyset(\cdot)$ و f_k بصورت $u_{c1,k}$، $u_{c2,k}$، $fault_{1,k}$ و $fault_{2,k}$ در نظر گرفته شده‌اند؛

$$fault_{i,k} = \Gamma(h_{i,k}) \times (f_{i,k}) \quad (۱۵)$$

$$\Gamma(h_{i,k}) = \begin{bmatrix} -\frac{T}{A}\sqrt{2gh_{1,k}} & 0 \\ 0 & az_2 T\sqrt{2gh_{2,k}} \end{bmatrix}^T, f_k = \begin{bmatrix} f_{1,k} \\ f_{2,k} \end{bmatrix} \quad (۱۶)$$

با توجه به قانون کنترل غیرخطی تعریف شده در رابطه (۱)، با فرض معلوم بودن دینامیک آن، کنترل‌کننده فیدبک خروجی غیرخطی برای این سیستم طراحی شده و بشرح رابطه (۱۵) در نظر گرفته شده است؛

$$\Sigma_6:\begin{cases} u_{c1,k} = A\left(y_{r1} - y_{1,k}\right) + Q_{13,k} \\ u_{c2,k} = A\left(y_{r2} - y_{2,k}\right) + Q_{20,k} - Q_{32,k} \end{cases} \quad (۱۷)$$

که در آن y_{r1} و y_{r2} سیگنال‌های مرجع می‌باشند؛

$$y_k = C_k[\bar{h}_{1,k}\ \bar{h}_{2,k}\ \bar{h}_{3,k}]^T + v_k \quad (۱۸)$$

شایان ذکر است ماتریس خروجی سیستم $C_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ می‌باشد و بیشینه جریان u_{c1} و u_{c2} به ترتیب $4\times10^{-5}\ \frac{m^3}{s}$ و $1.4\times10^{-5}\ \frac{m^3}{s}$ است و بردار نویز اندازه‌گیری بصورت بردار گوسی با میانگین 0 و ماتریس کواریانس Q_{vk} می‌باشد. در این شبیه‌سازی، بدلیل محدودیت جریان ورودی سیال، با توجه به زمان نمونه‌برداری $T = 1\ s$، حدود ۳۰۰۰ گام تا دستیابی به حالت کار دائم سیستم، زمان صرف می‌شود. مشخصات عیوب تدریجی در نظر گرفته شده و مقادیر مورد استفاده در شبیه‌سازی بشرح ذیل است:

$$f_{1,k} = \begin{cases} 0, & 0 \le k \le 8500 \\ 3\times10^{-5}\left(1 - e^{-0.011(k-8500)}\right) + w_{1,k}^f, & 8500 < k \end{cases} \quad (۱۹)$$

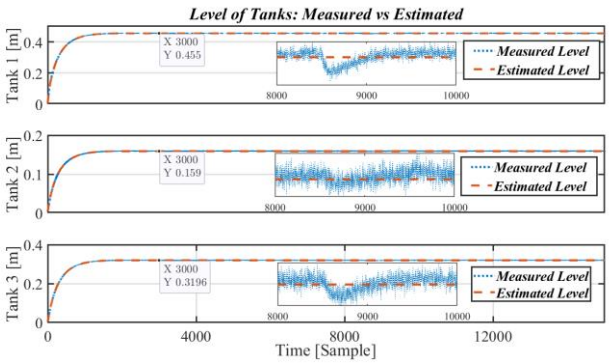
$$f_{2,k} = \begin{cases} 0, & 0 \le k \le 9500 \\ 3.5\times10^{-5}\left(1 - e^{-0.009(k-9500)}\right) + w_{2,k}^f, & 9500 < k \end{cases} \quad (۲۰)$$

سایر مشخصات، $\sigma_w^2 = 1\times10^{-7}$، $Q_v = \sqrt{0.25\times10^{-6}}I_2$، $Q_k^f = \sqrt{0.5\times10^{-12}}I_2$، $n = 5$، $\tau = 5$، $d = 1$، $t = 100$، $A_{m1,2} = 1$، $CV_{1,2} = 0.8$، $Z_{1,2} = 8$ و $y_{r1} = 0.445\ mm$، $y_{r2} = 0.158\ mm$.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.1.2.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power – Vol 11, No. 1, Spring 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

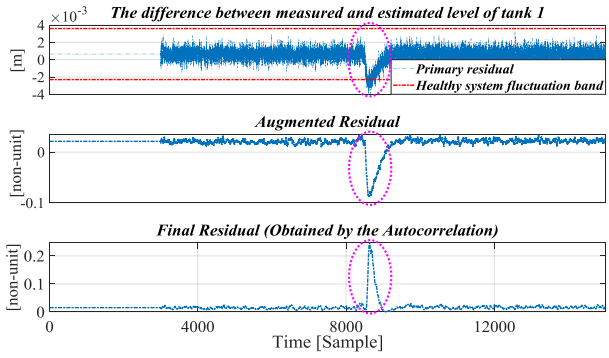
۴- نتایج شبیه‌سازی سیستم سه تانک

با توجه به نوع عیب که تدریجی در نظر گرفته شده است، ابتدا، بررسی بردار حالت سیستم صورت پذیرفته و تاثیر عیوب تدریجی بر بردار حالت، مورد نظر است. همانطور مورد انتظار بود و در شکل ۲ نشان داده شده است، داده‌های اندازه‌گیری شده در مقایسه با تخمین آن، تقریباً یکدیگر را پوشش می‌دهند، که بصورت کیفی عملکرد مناسب روش تخمین را تأیید می‌کند. شرایط حالت پایدار سیستم نیز در حدود گام ۳۰۰۰ بدست آمده است که برای بررسی داده‌های سیستم و تعیین مقادیر مناسب حد آستانه متغیر، واحد آشکارسازی عیب در این بازه غیرفعال در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲: نمودار بردار حالت سیستم، سطح تانک‌ها در طول زمان

همانطور که در بخش بزرگ‌نمایی ذیل هر نمودار در شکل ۲ نشان داده شده است، آثار عیوب تدریجی بواسطه عملکرد مناسب سیکل حلقه-بسته و دامنه کم نسبت به سیگنال اصلی، پنهان می‌شوند. برای شفاف‌سازی این موضوع، سیگنال مانده تانک شماره یک و دو، مانده نویز زدایی شده و مانده نهایی مربوط به عیب تدریجی، در شکل ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است.



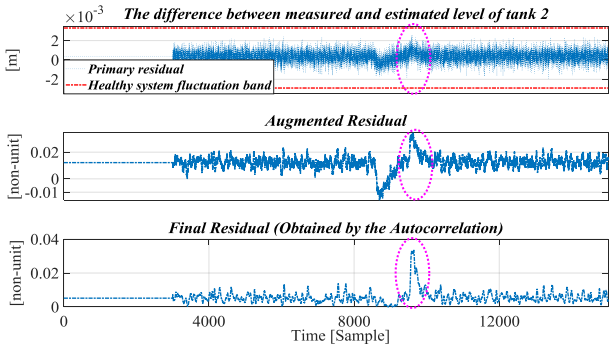
شکل ۳: مانده اولیه، مانده نویز زدایی شده و مانده نهایی مربوط به عیب تدریجی تانک شماره یک

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، نمودار فوقانی، سیگنال مانده مربوط به عیب تدریجی تانک شماره یک را نشان می‌دهد که مستقیماً از تفاضل اندازه‌گیری و برآورد خروجی (سطح تانک) بدست می‌آید. این سیگنال، مانده اولیه محسوب می‌شود و دارای نوسان زیادی است. باند نوسان نشان داده شده در شکل ۳، مربوط به مجموعه داده‌های در دسترس از سیگنال مانده در سیستم بدون عیب است.

ذکر این نکته ضروری است که برای اثبات کارایی رویکرد حل مسئله، ابعاد و اندازه عیب تدریجی، به نحوی انتخاب شده است که در محدوده نوسانات مربوط به نامعینی‌های سیستم در حالت بدون عیب باشد. لذا، آشکارسازی عیب تدریجی در این شرایط یک مسئله ساده و بدون دریافت هشدارهای کاذب نیست. همچنین، مسئله آشکارسازی به موقع، با توجه به محدودیت زمانی آشکارسازی این عیوب، با چالش روبرو است. از این رو، نمودار با حذف اغتشاشات از مانده اولیه بواسطه رابطه (۴)، نمودار میانی فرم تقویت شده مانده اولیه را نشان می‌دهد که روند رشد عیب را بصورت واضح‌تر نشان می‌دهد.

بر اساس آن، می‌توان رشد عیب تدریجی را پس از گام ۸۵۰۰ مشاهده کرد که روند کاهشی در سطح تانک شماره یک، بیانگر عیب نشتی است. با این حال، بدلیل وجود برخی اعوجاج‌ها و تاخیر مشاهده شده در نمایش روند رشد عیب، سیگنالی با قابلیت اطمینان بالاتر لازم است. لذا، با استفاده از ویژگی همبستگی سیگنال، نمودار پایین که در شکل ۳ نشان داده شده است، سیگنال مانده نهایی که بواسطه رابطه (۸) بدست آمده است، دارای سرعت رشد مناسب‌تر جهت آشکارسازی عیب تدریجی است.

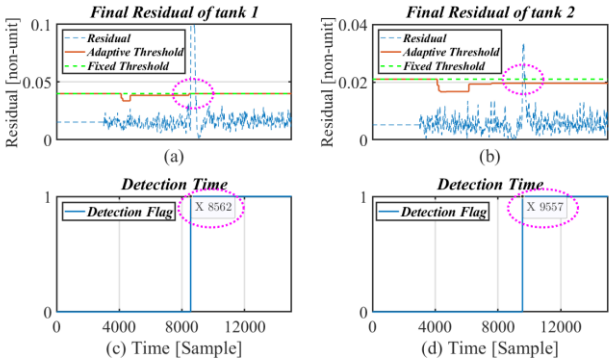
به همین ترتیب، مانده مربوط به عیب تدریجی تانک شماره دو، در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در هر سه نمودار این شکل نشان داده شده، مشخصات عیب تدریجی به نحوی انتخاب شده که دارای روند رشد بسیار نامحسوس بوده و در حدود نامعینی سیستم نهفته شود و به راحتی قابلیت آشکارسازی نداشته باشد. علیرغم این موضوع، سیگنال مانده نهایی تولید شده، نشان دهنده سیگنال واضح‌تری است که IFD را ممکن می‌سازد. همچنین، روند افزایشی رشد عیب، بیانگر افزایش سطح تانک شماره دو بوده و انسداد مسیر خروج سیال را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مانده اولیه، مانده نویز زدایی شده و مانده نهایی مربوط به عیب تدریجی تانک شماره دو

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.1.2.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power – Vol 11, No. 1, Spring 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

نکته حائز اهمیت که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، در زمان وقوع عیب مرتبط با تانک شماره یک، سیگنال مانده عیب در خروجی تانک شماره دو را تحریک نموده ولی بواسطه عملکرد تولید مانده نهایی و ارزیابی مربوطه، از آشکارسازی اشتباه جلوگیری بعمل آمده است و هدف آشکارسازی همزمان عیوب تدریجی بدست آمده است. سیگنال مانده نهایی و زمان‌های آشکارسازی مربوطه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: مانده نهایی و زمان آشکارسازی عیب تدریجی تانک شماره یک و دو

همانطور که ملاحظه می‌شود، شکل ۵ نمای مناسبی از عملکرد رویکرد ارائه شده را نشان می‌دهد. عطف به در نظر گرفتن بیشینه نویز فرآیند و اندازه‌گیری در شبیه‌سازی، اگر چه حد آستانه‌های ثابت و متغیر بسیار نزدیک به یکدیگر هستند، اما در مقیاس بزرگ از سیستم، یا در عدم حضور نامعینی‌ها، حد آستانه متغیر زمان آشکارسازی را بهینه کرده و عیوب تدریجی را در زمان‌های اولیه رشد آشکار می‌نماید.

علاوه بر ارزیابی‌های کیفی بیان شده، با هدف ارزیابی کمی عملکرد این روش، استفاده از ماتریس اختلاط و معیارهای ارزیابی مرتبط و بطور خاص معیار امتیاز اف-وان، بشرح بیان شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده است. مشخصات تشکیل این ماتریس و نتایج شبیه‌سازی تشخیص عیب نیز در

جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی، دو سیگنال عیب بصورت مستقل پایش شده است، برای ارزیابی کلی سیستم، در ماتریس اختلاط برای بررسی وقوع همزمان دو عیب، تعداد تست‌های انجام شده دو برابر شبیه‌سازی انجام شده، در نظر گرفته شده است. برای تعیین حداقل تکرار مورد نیاز دستیابی به نتایج قابل اعتماد، مطابق با روش بیان شده در [۲۵] و با استفاده از داده‌های سیستم بدون عیب، بشرح رابطه (۲۱) انجام شده است.

$$N = \left(\frac{100\, z_{\frac{a}{2}}\sqrt{S_x}}{E\,\bar{X}}\right)^2 \qquad (۲۱)$$

که در آن N تعداد تکرار مورد نیاز، S_x و $\bar{X}$ واریانس و میانگین داده‌ها، $z_{\frac{a}{2}}$ نمره استاندارد توزیع نرمال، E حاشیه خطا می‌باشد. این مقادیر در سیستم بدون عیب می‌بایست تعیین گردند که با در نظر گرفتن ۱,۰۰۰,۰۰۰ نمونه از هر سیگنال تحت پایش در سیستم بدون عیب، نتایج مربوطه در جدول ۳ ارائه شده است. با استفاده از این نتایج و در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪ نمره استاندارد $z_{\frac{a}{2}}$ برابر با ۱,۹۶ و حاشیه اطمینان ۵ واحد، مقدار N به ترتیب ۱۴۲۵ و ۳۹۷۰ بدست آمد. بر این اساس، نتایج شبیه‌سازی در ۴۰۰۰ تکرار با شرایط متفاوت نویزهای گوسی و غیرگوسی در هر تکرار، در

جدول ۲ ارائه شده است.

همانطور که از اطلاعات جدول ۱ قابل برداشت است، تشخیص همزمان دو عیب با در نظر گرفتن تعداد محدود تشخیص‌های کاذب، صورت پذیرفته است. همچنین، شاخص دقت این روش ۹۹,۵۶٪ و امتیاز اف-وان نیز ۹۹,۷۸٪ بوده که در کنار سایر شاخص‌های مندرج در این جدول‌ها (به استثناء نرخ مثبت کاذب (خطا) و نرخ منفی صحیح (ویژگی))، بیانگر عملکرد مناسب این رویکرد است.

جدول ۱: ماتریس اختلاط نتایج شبیه‌سازی تشخیص عیب و شاخص‌های ارزیابی کمی

واقعیت / پیش‌بینی	مثبت (Positive)	منفی (Negative)
صحیح (True)	TD = ۷۹۶۶	FA=۱۲
غلط (False)	FD=۳۴	MD=۱
شاخص	نتیجه	
TPR: نرخ مثبت صحیح (حساسیت)	۹۹.۹۹٪	
TNR: نرخ منفی صحیح (ویژگی)	۲۶.۰۹٪	
PPV: پیش‌بینی مثبت (دقت)	۹۹.۵۸٪	
NPV: پیش‌بینی منفی	۹۲.۳۱٪	
FNR: نرخ منفی کاذب (نرخ گم‌شدن سیگنال)	۰.۰۱٪	
FPR: نرخ مثبت کاذب (خطا)	۷۳.۹۱٪	
FDR: نرخ کشف کاذب	۰.۴۳٪	
ACC: دقت (صحت)	۹۹.۵۶٪	
F1-Score: میانگین توافقی دقت و حساسیت	۹۹.۷۸٪	
TD: تشخیص صحیح، FA: هشدار کاذب، FD: تشخیص کاذب، MD: تشخیص از دست رفته		

جدول ۲: نتایج کمی شبیه‌سازی در ۴۰۰۰ تکرار با شرایط متفاوت نویز

مشخصات و محل عیب	عیب تدریجی نشتی در بدنه تانک شماره یک با زمان وقوع در گام ۸۵۰۰ شبیه سازی	عیب تدریجی گرفتگی در خروجی تانک شماره دو با زمان وقوع در گام ۹۵۰۰ شبیه سازی
میانگین زمان تشخیص	۸۵۵۸,۹	۹۵۵۳,۹
طولانی‌ترین زمان تشخیص	۸۵۶۸	۹۶۶۹
کوتاه‌ترین زمان تشخیص	۸۵۵۰	۹۵۲۹
میانگین زمان اجرای شبیه‌سازی	۰,۰۵ ثانیه به ازای هر تکرار شامل ۱۵,۰۰۰ گام نمونه‌برداری	

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.1.2.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power – Vol 11, No. 1, Spring 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

جدول ۴: داده های سیستم بدون عیب با بررسی ۱,۰۰۰,۰۰۰ نمونه از هر سیگنال تحت پایش

مشخصات سیگنال تحت پایش	عیب تدریجی نشتی در بدنه تانک شماره یک	عیب تدریجی گرفتگی در خروجی تانک شماره دو
میانگین نمونه‌ها	۶,۱۹×۱۰-۴	۳,۶۹×۱۰-۴
واریانس نمونه‌ها	۳,۵۵×۱۰-۷	۳,۵۱×۱۰-۷
مقدار کمینه نمونه‌ها	-۰,۰۰۲۲۶	-۰,۰۰۲۸۲
مقدار بیشینه نمونه‌ها	۰,۰۰۳۵۶	۰,۰۰۳۲۸

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ضمن بیان اهمیت آشکارسازی عیب تدریجی در عموم سیستم‌ها، بررسی این موضوع در سیستم‌ها غیرخطی حلقه-بسته در محیط نویزی در شرایط حضور همزمان نویزهای گوسی و غیرگوسی صورت گرفته است. ارزیابی این رویکرد، بر پایه تخمین بردار حالت سیستم بواسطه مدل در دسترس سیستم و تخمین عیب صورت گرفت. سپس، با استفاده از ویژگی آماری، با کاهش سطح سیگنال‌های مزاحم در مانده اولیه، قابلیت آشکارسازی عیب تدریجی فراهم آمد. برای ارزیابی مانده، حد آستانه ثابت و حد آستانه متغیر آشکارسازی عیب برای در نظر گرفتن تمامی شرایط نامعینی‌ها معرفی گردید.

به منظور بررسی اثربخشی این رویکرد، با شبیه‌سازی سیستم غیرخطی صنعتی سه تانک به‌هم‌پیوسته DTS200، آشکارسازی عیوب تدریجی نشتی در بدنه تانک و گرفتگی در مسیر خروجی سیال، بررسی شد و علیرغم دامنه بسیار کوچک عیوب تدریجی نسبت به مقادیر بردار حالت سیستم (ارتفاع تانک‌ها)، نتایج مربوطه عملکرد مناسب این رویکرد را تصدیق نمود.

ارزیابی عملکرد این رویکرد نیز بواسطه تشکیل ماتریس اختلاط و امتیاز اف-وان، صورت پذیرفت که نتایج این ارزیابی کمی، بیانگر کارایی لازم رویکرد تشخیص عیب تدریجی در این سیستم‌ها است.

مراجع

[۱] B. Shafai and A. Moradmand, "Design of an Integrated Observer Structure for Robust Fault Detection," in 2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2020: IEEE, pp. 248-253 .

[۲] C. Zhao and B. Huang, "Incipient fault detection for complex industrial processes with stationary and nonstationary hybrid characteristics," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 57, no. 14, pp. 5045-5057, 2018.

[۳] K. Watanabe, I. Matsuura, M. Abe, M. Kubota, and D. Himmelblau, "Incipient fault diagnosis of chemical processes via artificial neural networks," AIChE journal, vol. 35, no. 11, pp. 1803-1812, 1989.

[۴] Z. He, Y. A. Shardt, D. Wang, B. Hou, H. Zhou, and J. Wang, "An incipient fault detection approach via detrending and denoising ",Control Engineering Practice, vol. 74, pp. 1-12, 2018.

[۵] H.-d. Wang, S.-e. Deng, J.-x. Yang, H. Liao, and W.-b. Li, "Parameter-Adaptive VMD Method Based on BAS Optimization Algorithm for Incipient Bearing Fault Diagnosis," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2020, 2020.

[۶] W. Mao, L. Ding, S. Tian, and X. Liang, "Online detection for bearing incipient fault based on deep transfer learning," Measurement, vol. 152, p. 107278, 2020.

[۷] B. Ding and H. Fang, "Fault estimation and prediction for nonlinear stochastic system with intermittent observations," International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 28, no. 4, pp. 1165-1181, 2018.

[۸] S. Gautam, P. K. Tamboli, V. H. Patankar, S. P. Duttagupta, and K. Roy, "Performance Evaluation of Statistical Method for Incipient Fault Detection under Noisy Environment," IFAC-PapersOnLine, vol. 50, no. 1, pp. 15728-15733, 2017.

[۹] 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.

[۱۰] 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.

[۱۱] 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.

[۱۲] 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.

[۱۳] 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.

[۱۴] 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.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.1.2.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power – Vol 11, No. 1, Spring 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[۱۵] 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.

[۱۶] 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, 201۷

[۱۷] 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.

[۱۸] 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 .

[۱۹] 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.

[۲۰] H. Khalil, "Nonlinear systems and control," ed: Prentice Hall, 1998.

[۲۱] 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 .

[۲۲] R. Toscano, "Signal and system norms," in Structured Controllers for Uncertain Systems: Springer, 2013, pp. 25-44.

[۲۳] S. X. Ding, Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools. Springer Science & Business Media, 2008.

[۲۴] H. Safaeipour, M. Forouzanfar, and A. Ramezani, "Incipient fault detection in nonlinear non-Gaussian noisy environment," Measurement, vol. 174, p. 109008, 2021.

[۲۵] M. R. Driels and Y. S. Shin, "Determining the number of iterations for Monte Carlo simulations of weapon effectiveness," Naval Postgraduate School Monterey Ca Dept of Mechanical and Astronautical …, 2004 .

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.1.2.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power – Vol 11, No. 1, Spring 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Simultaneous Pipe Jamming and Tank Leakage Incipient Fault Detection in Interconnected Industrial Tank Systems

Hossein Safaeipour[1], Mehdi Forouzanfar*[2], Amin Ramezani[3]

1-Ph.D. student, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
*2-Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, m.forouzanfar@iauahvaz.ac.ir
3- Assistant Professor, Electrical and Computer Engineering Department, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.

Abstract: In chemical closed-loop processes, interconnected industrial tanks are described by nonlinear dynamic models, sometimes under simultaneous Gaussian and non-Gaussian perturbations. Timely detection of simultaneous pipe jamming and tank leakage incipient faults is a concern of this art. In this work, a new incipient fault detection approach is proposed for application in such a system. First, the state vector is estimated using an accurate mathematical model and controller model. Then, the primary residual signal is generated using the measurements and the estimated states. Next, the generated residual signal is processed using statistical features, such as the autocorrelation test. After that, by an adaptive either fixed threshold applied in the online monitoring devised with the introduced evaluation technique, while the fault detectability is improved, the false detection problem is restricted to the system permitted number. Finally, in order to evaluate the proposed approach, the simultaneous fouling incipient fault diagnosis over the heat transfer unit built-in nonlinear closed-loop three-vessel tank system DTS200 is considered. For quantitative evaluation of the simulation results, the confusion matrix, related evaluation indices, and F1-score have been calculated.

Keywords: Autocorrelation, Incipient fault detection, Model-based, Non-Gaussian, Stochastic.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.1.2.4]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power – Vol 11, No. 1, Spring 2022