

آشکارسازی مقاوم عیب با تلفیق بانداگراف و مشاهده گر ورودی نامعلوم

محمد قاسم کاظمی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محسن منتظری*

استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله به طراحی یک سیستم آشکارساز عیب مقاوم با تلفیق بانداگراف و مشاهده گر ورودی نامعلوم پرداخته شده است. روش پیشنهادی یک سیستم آشکارساز عیب دو مرحله‌ای بوده که در هر مرحله برخی معیارهای مطلوب یک سیستم تشخیص عیب در نظر گرفته می‌شود. در مرحله اول، مبتنی بر مدل بانداگراف، معادلات فضای حالت بر اساس متغیرهای انرژی استخراج شده و با استفاده از مشاهده گر ورودی نامعلوم حالت‌ها و خروجی‌های سیستم به نحوی تخمین زده می‌شوند که نسبت به اغتشاشات وارده به سیستم بی‌تاثیر باشند. سپس با استفاده از فرم روابط تحلیلی افزودنی بر حسب خطای تخمین خروجی که شامل تاثیر عیب بوده و تاثیر اغتشاش در آن برطرف شده است به آشکارسازی عیب پرداخته می‌شود. به منظور آشکارسازی عیب از آستانه تطبیقی استخراج شده از جمله نامعین روابط تحلیلی افزودنی بر حسب خطا استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم تعلیق فعال خودرو نشان‌دهنده عملکرد بسیار مناسب روش پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی مقاوم عیب، تضعیف اغتشاش، بانداگراف، آستانه تطبیقی، مشاهده گر ورودی نامعلوم.

A new robust fault detection method based on combination of bond graph and unknown input observer

M. Gh. Kazemi

Department of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

M. Montazeri

Department of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, a new active robust fault detection method based on combination of bond graph and Unknown Input Observer (UIO) is proposed. The proposed two-stage method will satisfy some desirable criteria of a fault detection system. In the first stage, an UIO based on derived state space representation form from the bond graph model is used to estimate the states and outputs of the system, which are insensitive to disturbances in the system. Then, the obtained Analytical Redundancy Relations (ARRs) are considered based on the output estimation error of the observer, which are sensitive to faults while are robust against the disturbances. This form of residuals is called Error-based Analytical Redundancy Relations (EARRs), which further becomes robust against parametric uncertainties by defining adaptive thresholds on the parameters' values of bonding graph model. Simulation results for an active suspension system are provided to show the great performance of the proposed method.

Keywords: Robust Fault Detection, Disturbance Attenuation, Bond Graph, Adaptive thresholds, Unknown Input Observer.

توجه بوده و رویکردهای متعددی در این راستا مطرح شده است. در واقع می‌توان گفت که قلب یک روش تشخیص عیب مبتنی بر مدل، مدل بکار گرفته شده بدین منظور است. آرایه مدل مناسب برای یک سیستم با در نظر گرفتن چندحوزه‌ای بودن سیستم‌های صنعتی از پیچیدگی زیادی برخوردار است و به عنوان یکی از چالش‌های اساسی در طراحی سیستم آشکارساز عیب مبتنی بر مدل کمی مطرح است. بانداگراف ابزاری مناسب برای مدل‌سازی سیستم‌های چندحوزه‌ای بوده و به منظور نمایش حوزه‌های مختلف با زبان مشترک بصورت گرافیکی آرایه شده است. در [۳] به تشریح کامل روش بانداگراف در مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌ها پرداخته شده است. کاربردهای متعدد روش بانداگراف در مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی [۷-۴]، تشخیص عیب [۱۰-۸]، حسگرگذاری^۱ مناسب [۱۱] و ... در مقالات مختلف آرایه شده است. زبان مشترک بانداگراف در حوزه‌های مختلف انرژی باعث گسترش استفاده و همچنین توسعه این روش به منظور مدل‌سازی سیستم‌های مختلف در حوزه‌های مختلف شده است. به عنوان نمونه،

۱- مقدمه

تشخیص عیب در سیستم‌های مختلف از اهمیت زیادی برخوردار است. تشخیص به موقع عیب در یک سیستم می‌تواند از خرابی و خسارت‌های آن سیستم جلوگیری نموده و لذا دارای ارزش افزوده بسیار بالایی است. با توجه به اهمیت تشخیص عیب، روش‌های متعدد و کاربردهای گوناگونی از سیستم‌های تشخیص عیب در مقالات مختلف دیده می‌شود. تشخیص عیب شامل مراحل آشکارسازی، جداسازی و شناسایی عیب رخ داده در سیستم است.

روش‌های تشخیص عیب به صورت کلی به دو دسته روش‌های مبتنی بر مدل و مبتنی بر داده قابل تقسیم‌بندی هستند [۱]. برای دستیابی به عملکرد مناسب یک سیستم آشکارساز عیب برای یک سیستم صنعتی پیچیده، عموماً نیاز به مدل مناسب از آن است. روش‌های مبتنی بر مدل خود به دو دسته مبتنی بر مدل کمی و مبتنی بر مدل کیفی تقسیم‌بندی می‌شوند [۲]. آرایه مدلی مناسب برای سیستم‌های صنعتی که بتوان از آنها در سیستم آشکارساز عیب استفاده نموده و یک سیستم تشخیص عیب مبتنی بر مدل طراحی کرد، همواره مورد

^۱. Sensor placement

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m_montazeri@sbu.ac.ir

بررسی کاملی از سیستم‌های تشخیص مقاوم عیب با قابلیت پیکربندی مجدد^۳ صورت گرفته است. یک دسته‌بندی کاملی از روش‌های تولید مانده با تاکید بر مقاوم بودن روش بیان شده و به بررسی کامل مشاهده-گر ورودی نامعلوم پرداخته است.

در ادامه توسعه روش باندگراف، با معرفی تبدیل کسری خطی^۴ LFT عدم قطعیت پارامتری، به استفاده از این روش در تشخیص عیب مقاوم سیستم‌های مختلف پرداخته شد. مدلسازی و تشخیص عیب یک مولد بخار با استفاده از مدل باندگراف همراه با عدم قطعیت در [۷] ارایه شده است. در [۹] به مدلسازی و تشخیص مقاوم عیب برای یک سیستم موتور DC پرداخته شده و با داده برداری واقعی از سیستم و استفاده از تکنیک‌های شناسایی سیستم، پارامترهای مدل باندگراف تعیین شده است. با توجه به اینکه پارامترهای بدست آمده ثابت نبوده و در یک محدوده مشخص قرار می‌گیرند، مقدار نامی بصورت متوسط و میزان عدم قطعیت بصورت انحراف معیار این پارامترها در نظر گرفته شده و یک سیستم تشخیص مقاوم عیب با در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها (عدم قطعیت مدلسازی) توسعه داده شده است. در [۲۰] به بررسی تشخیص و پیش‌بینی مقاوم عیب در سیستم‌های پیوسته مبتنی بر روش باندگراف پرداخته شده است. رویکرد بکار برده شده در اینجا برای مقاوم کردن سیستم تشخیص عیب بصورت غیرفعال و مبتنی بر فرم نمایش عدم قطعیت بصورت LFT است و روی یک مکانیزم بالاتر اعمال شده و چند عیب به سیستم تزریق و شناسایی شده است. در [۲۱] یک روش آشکارساز مقاوم عیب با ترکیب مشاهده‌گر لوبنرگر و روش باندگراف با رویکرد تضعیف اغتشاش ارایه شده است.

در کارهای ارایه شده در تشخیص عیب مقاوم با روش باندگراف فقط تاثیر عدم قطعیت پارامتری لحاظ شده است و مبتنی بر یک محدوده تعریف شده آستانه‌های اعمالی روی مانده‌ها استخراج می‌گردد. در کارهای صورت گرفته، تاثیر اغتشاش در سیستم تشخیص عیب در نظر گرفته نشده و ذکر این نکته ضروری است که تاثیر اغتشاش در مانده‌ها می‌تواند به مراتب بیشتر از تاثیر عدم قطعیت پارامتری و یا نویز باشد. در روش معمول آشکارسازی عیب با استفاده از باندگراف از روابط تحلیلی افزونگی استخراجی از مدل سیستم با استفاده از قانون پایستگی جرم و انرژی استفاده می‌شود. این روابط بر حسب ورودی، خروجی و پارامترهای تعریف شده در مدل باندگراف هستند و به فرم معادلات دیفرانسیل از مرتبه‌های مختلف تعریف می‌شوند. مرتبه بالاتر در این معادلات بیان‌کننده سنسورگذاری نامناسب در سیستم است. همچنین وجود روابط تحلیلی افزونگی به فرم معادله جبری دلالت بر وجود افزونگی سخت‌افزاری در سیستم دارد. خروجی یک سیستم می‌تواند متأثر از اغتشاش، نویز و عیب باشد. همچنین عدم قطعیت‌های مدلسازی در استخراج پارامترهای مدل باندگراف نیز می‌تواند منجر به اشتباه سیستم تشخیص عیب گردد.

لذا در این مقاله با یک رویکرد جدید به حل این مشکل پرداخته شده است و بجای استفاده از اطلاعات ورودی و خروجی سیستم بصورت مستقیم، از اطلاعات خطای تخمین خروجی که نسبت به اغتشاشات مقاوم بوده و در بردارنده اطلاعات عیب است استفاده می-

در [۱۲] به توسعه روش باندگراف به منظور مدلسازی نازل غیرآیزنتروپیک پرداخته شده است.

از سوی دیگر مشاهده‌گرها به عنوان دسته اساسی روش‌های مبتنی بر مدل در سیستم‌های مختلف و برای کلاس‌های مختلف از سیستم‌های خطی و غیرخطی مطرح شده و توسعه یافته‌اند. مشاهده‌گر ورودی نامعلوم به عنوان یکی از پرکاربردترین مشاهده‌گرهای مقاوم بوده که می‌تواند تاثیر ورودی‌های نامعلوم (تمامی فاکتورهای مجهول در مدلسازی سیستم) را روی خطای تخمین حذف نماید. در طراحی مشاهده‌گر ورودی نامعلوم لازم است که ماتریس توزیع ورودی نامعلوم مشخص باشد [۱۳]. در استفاده از مشاهده‌گر ورودی نامعلوم، هدف دستیابی به یک روش مقاوم آشکارسازی عیب بوده که با وجود مدل غیردقیق از سیستم، خطای تخمین به ورودی‌های نامعلوم غیرحساس بوده و در مقابل نسبت به عیوب حساس باشد. در واقع به منظور تولید یک مدل مانده مقاوم، لازم است که برخی فرضیات در مورد عدم قطعیت‌های مدلسازی در نظر گرفته شود. پرکاربردترین فرض این است که عدم قطعیت مدلسازی بصورت یک ترم اغتشاش در معادله دینامیکی سیستم بیان شود [۱۳]. اگرچه اندازه اغتشاش ناشناخته است ولی توزیع یا جهت آن از قبل معلوم و شناخته شده فرض می‌شود. مبتنی بر این فرض، مولد مانده جداکننده اغتشاش می‌تواند با استفاده از نظریه مشاهده‌گر ورودی نامعلوم یا تکنیک‌های اختصاص مقادیر ویژه طراحی شود. سپس تشخیص عیب مقاوم با استفاده از مانده‌های دکوپله شده از اغتشاش قابل دستیابی است.

با توجه به کارایی مشاهده‌گر ورودی نامعلوم، کارهای متعددی به بهبود، توسعه و کاربرد این روش به منظور تشخیص عیب پرداخته‌اند. مساله طراحی مشاهده‌گر تخمین عیب با وجود ورودی نامعلوم نامنطبق برای سیستم‌های خطی در [۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است. یک رویکرد مقاوم تشخیص عیب برای کلاسی از سیستم‌های غیرخطی لپسیتز بر اساس مشاهده‌گر ورودی نامعلوم و مانده فازی در [۱۵] ارایه شده است. تخمین عیب در یک کلاس از سیستم‌های غیرخطی با اتصال داخلی و با تاخیر زمانی متغیر با زمان با استفاده از مشاهده‌گر ورودی نامعلوم تطبیقی مقاوم در [۱۶] پیشنهاد شده است. همچنین استفاده از نابرابری ماتریسی برای تولید مانده مقاوم در سیستم تشخیص عیب مبتنی بر مشاهده‌گر ورودی نامعلوم در [۱۷] مورد توجه قرار گرفته است. در [۱۸] از مشاهده‌گر ورودی نامعلوم به منظور تشخیص عیب توربین بادی استفاده شده است.

مقاوم بودن به عنوان یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های یک سیستم تشخیص عیب قابل بیان است. وجود اغتشاشات، نویز و عدم قطعیت می‌تواند منجر به آلام هشدار نادرست^۱ یا هشدار از دست رفته^۲ گردد. لذا باید تاثیر این اغتشاشات، عدم قطعیت‌ها و نویز در سیستم تشخیص عیب لحاظ گردد تا در عین حساسیت به عیوب، نسبت به موارد فوق مقاوم باشد. در [۱۳] به بررسی کامل روش‌های مبتنی بر مشاهده‌گر با تاکید بر مشاهده‌گر ورودی نامعلوم به منظور تشخیص مقاوم عیب پرداخته و انواع روش‌های مطرح به منظور مقاوم‌سازی نسبت به اغتشاش، نویز و عدم قطعیت‌های سیستم بیان شده است. در [۱۹]

^۳. Fault Detection, Isolation and Reconfiguration Methods

^۴. Linear Fractional Transformation

^۱. False alarm

^۲. Missed alarm

این روش به منظور مدلسازی و تشخیص عیب سیستم‌های دینامیکی در [۳] بیان شده است.

در تشخیص عیب مبتنی بر باندگراف از روابط تحلیلی افزونگی^۱ (ARRs) استفاده می‌شود. ARRها با استفاده از روش‌های مختلف از مدل باندگراف سیستم قابل دستیابی بوده و بر حسب ورودی‌ها، خروجی‌ها و پارامترهای تعریف شده سیستم در مدل باندگراف است. فرم کلی یک ARR بصورت (۱) قابل بیان است [۳]:

$$ARR: \varphi(y^{(n)}, \dots, y, u^{(m)}, \dots, u, \theta) \quad (1)$$

که در آن y خروجی، u ورودی و θ پارامترهای مدل باندگراف (R, C, L, ...) است. در حالت نرمال مقدار یک ARR باید صفر باشد ولی به دلیل وجود اغتشاشات، عدم قطعیت‌ها و نویز در سیستم این مقدار همواره غیرصفر بوده و یک آستانه به منظور آشکارسازی عیب در نظر گرفته می‌شود. همانگونه که از رابطه (۱) برداشت می‌شود اطلاعات ورودی، خروجی و مشتقات آنها و پارامترهای سیستم، به سیستم تشخیص عیب داده می‌شوند و در نتیجه حضور اغتشاشات، نویز و عدم قطعیت‌ها بطور مستقیم روی سیستم تشخیص عیب تاثیرگذار است.

هدف اصلی این مقاله طراحی یک سیستم تشخیص عیب مقاوم مبتنی بر روش باندگراف با در نظر گرفتن اغتشاشات و عدم قطعیت پارامتری است. ARRها با استفاده از معادلات ساختاری مدل باندگراف در علت مشتقی بدست می‌آیند و در نتیجه بصورت معادلات دیفرانسیل بر حسب زمان هستند. مرتبه بالا در ARRها دلالت بر سنسورگذاری نامناسب در سیستم دارد و عملاً مرتبه بالاتر از ۲ در تشخیص عیب نمی‌تواند کارایی چندانی داشته باشد. لذا در اینجا فرض شده که بالاترین مرتبه مشتق در ARRها برابر ۲ است. با این فرض صورت کلی ARRها می‌تواند بصورت معادله (۲) بیان گردد [۲۱].

$$ARR: \varphi(\ddot{y}, \dot{y}, y, \ddot{u}, \dot{u}, u, \theta) = M_1(\theta)\ddot{y}(t) + M_2(\theta)\dot{y}(t) + M_3(\theta)y(t) + N_1(\theta)\ddot{u}(t) + N_2(\theta)\dot{u}(t) + N_3(\theta)u(t) \quad (2)$$

که در آن φ معادله کلی ARR بر حسب اطلاعات معلوم سیستم است. در این رابطه y و u بردار ورودی‌ها و خروجی‌ها هستند. ضرایب اطلاعات ورودی و خروجی بصورت ماتریس‌های با ابعاد مناسب $M_i \in \mathbb{R}^l$ و $N_i \in \mathbb{R}^k$ که $i=1,2,3$ نمایش داده شده است که در آنها l و k به ترتیب بیان‌کننده تعداد حسگرها (خروجی‌ها) و تعداد ورودی‌ها است. این ماتریس‌ها به پارامترهای مدل باندگراف که با θ نمایش داده شده است وابسته هستند. همچنین علاوه بر ورودی و خروجی‌ها، مشتقات آنها نیز در فرم کلی ARR وجود دارند.

همانگونه که بیان شد خروجی‌های مورد استفاده در روابط تحلیلی افزونگی در بردارنده تاثیرات اغتشاش و نویز نیز می‌باشد. همچنین به دلیل اینکه روابط موجود به صورت معادله دیفرانسیل هستند تغییر ناگهانی ورودی یا خروجی‌ها (به هر دلیل) منجر به تغییرات ARRها خواهد شد. علاوه بر این، وجود نویز فرکانس بالا در اندازه‌گیری‌ها اگر فیلتر نشود منجر به دامنه زیاد آنها در ARRها بواسطه مشتق‌گیری از آنها می‌شود. در این مقاله به بررسی تاثیر اغتشاش و عدم قطعیت

شود. در این راستا نیاز به تعریف دو مرحله در سیستم تشخیص عیب است. در مرحله اول استفاده از یک مشاهده‌گر مقاوم که خطای تخمین آن در بردارنده اطلاعات عیب بوده و نسبت به اغتشاشات وارده به سیستم مقاوم باشد که این مرحله با استفاده از مشاهده‌گر ورودی نامعلوم صورت گرفته است. در مرحله دوم نیاز به تعریف روابط تحلیلی افزونگی بر حسب این خطای تخمین است تا امکان مناسب استفاده از این روابط در آشکارسازی عیب‌های سیستم و جداسازی و همچنین شناسایی آنها با توجه به حساسیت بالای این روابط به عیب امکان‌پذیر باشد. برای دستیابی به چنین موردی فرم جدیدی از روابط تحلیلی افزونگی بر حسب خطای تخمین پیشنهاد شده است. لذا در نهایت یک سیستم تشخیص عیب دو مرحله‌ای ارائه شده است که در مقایسه با روش معمول از مزایای روش باندگراف و مشاهده‌گر بصورت همزمان برخوردار است و با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری به آشکارسازی عیب با مقایسه مانده‌های بدست آمده از روابط تحلیلی افزونگی بر حسب خطای تخمین و آستانه‌های تطبیقی استخراجی بواسطه عدم قطعیت پارامتری می‌پردازد.

بطور خلاصه نوآوری این مقاله بصورت زیر قابل بیان است:

- ارائه یک فرم مقاوم از مانده مبتنی بر تلفیق باندگراف و مشاهده‌گر که نسبت به اغتشاش و عدم قطعیت پارامتری مقاوم بوده و حساسیت عیب بالاتری داشته و منجر به بهبود عملکرد سیستم تشخیص عیب می‌شود.

روش ارائه شده محاسبات بالاتری در مقایسه با روش معمول ARR داشته که با توجه به عملکرد مقاوم و با حساسیت بالا به عیب، قابل توجیه است. این روش محدودیتی در پیاده‌سازی ندارد و امکان پیاده‌سازی بلادرنگ آن نیز به راحتی وجود دارد.

در ادامه ساختار مقاله به شرح زیر است. در بخش ۲ به معرفی روش باندگراف به منظور تشخیص مقاوم عیب پرداخته می‌شود و روابط تحلیل افزونگی بر حسب خطای تخمین خروجی و آستانه‌های تطبیقی مبتنی بر این فرم از مانده‌ها معرفی خواهد شد. در بخش ۳ به بررسی مشاهده‌گر ورودی نامعلوم برای سیستم مورد نظر پرداخته می‌شود که با نتایج بخش ۲ تلفیق شده تا سیستم تشخیص عیب پیشنهادی تشکیل شود. در بخش ۴ به بررسی نتایج روش پیشنهادی در مقایسه با رویکرد معمول با شبیه‌سازی یک سیستم تعلیق فعال خودرو پرداخته می‌شود.

۲- تشخیص مقاوم عیب با استفاده از روش باندگراف

روش باندگراف با یک زبان مشترک به مدلسازی سیستم‌های دینامیکی در حوزه‌های مختلف انرژی می‌پردازد. مدل بدست آمده یک مدل گرافیکی بوده که شامل یک سری المان محدود تعریف شده در حوزه باندگراف است. معادلات فضای حالت با تعریف المان‌های انرژی در مدل باندگراف با استفاده از روش‌های موجود قابل استخراج است. مدل باندگراف باید در علت انتگرالی بوده تا معادلات فضای حالت سیستم استخراج گردند. همچنین به منظور شبیه‌سازی مدل باندگراف نیز فرم انتگرالی علت مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرم دیگر علت تعریف شده در مدل باندگراف، فرم مشتقی بوده که به منظور استخراج روابط تحلیلی افزونگی نیاز به استفاده از این فرم است. جزئیات بیشتر

¹ Analytical Redundancy Relations

شده است. به منظور استخراج آستانه‌های تطبیقی در رویکرد پیشنهادی، روش ارایه شده در [۲۳] به روابط تحلیلی افزونگی بر حسب خطا تعمیم داده می‌شود.

در آشکارسازی مقاوم عیب مبتنی بر باندگراف یک ARR بصورت مجموع یک قسمت نامی (ARR_n) و یک قسمت نامعین ($UARR^*$) بصورت معادله زیر جداسازی می‌شود.

$$ARR = ARR_n(\theta_n, u, y) + UARR(\delta_n, u, y) \quad (7)$$

که در آن θ_n مقدار نامی پارامترها و δ_n انحراف نسبی نسبت به مقدار نامی پارامتر θ است. با در نظر گرفتن رابطه (۷)، مانده‌های ارایه شده در این مقاله که روابط تحلیلی افزونگی بر حسب خطای تخمین هستند، می‌توانند بصورت زیر بیان شوند:

$$EARR = EARR_n(\theta_n, e_y) + UEARR(\delta_n, e_y) \quad (8)$$

قسمت نامی یک $EARR$ یعنی $EARR_n$ همان مانده سیستم تشخیص عیب بوده و در بردارنده مقدار نامی پارامترهاست. قسمت نامعین یک $EARR$ که $UEARR$ نامیده شده و به مقدار تخمین خروجی و انحرافات نسبی پارامترها از مقادیر نامی وابسته است، تعیین کننده آستانه تطبیقی مانده‌هاست. در حالت نرمال باید مقدار مانده در محدوده زیر قرار گیرد:

$$-|UEARR| \leq r = EARR_n \leq |UEARR| \quad (9)$$

۳- مشاهده‌گر ورودی نامعلوم

مشاهده‌گر ورودی نامعلوم یکی از روش‌های مناسب برای تولید مانده‌ی مقاوم در تشخیص عیب است. استفاده از مشاهده‌گر ورودی نامعلوم در مواردی که ورودی‌های مجهول از قبیل اغتشاشات خارجی و عدم قطعیت‌های مدل‌سازی در سیستم وجود دارند بسیار کارآمد بوده و بطور موثری می‌تواند مانده‌ای تولید نماید که به طور کامل از ورودی‌های مجهول جداسازی شده باشد. در کارهای تشخیص عیب مبتنی بر مشاهده‌گر ورودی نامعلوم، یک مانده مقاوم به ورودی نامعلوم طراحی می‌شود. در اینجا به منظور بهره‌گیری از مزایای روش باندگراف و استفاده از روابط تحلیلی افزونگی بر حسب خطای تخمین خروجی، از مشاهده‌گر ورودی نامعلوم به منظور تخمین خطای خروجی و تولید خطای تخمین خروجی استفاده می‌شود. خطای تخمین خروجی بدست آمده از مشاهده‌گر به عیب‌های سیستم حساس بوده و در مقابل نسبت به اغتشاشات وارده به سیستم غیر حساس است. معادله حالت سیستم را که از مدل باندگراف استخراج شده است بصورت زیر در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + G_d d(t) + G_f f(t) \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $x \in R^n$ بردار حالت سیستم، $u \in R^r$ بردار ورودی سیستم، $y \in R^m$ بردار خروجی سیستم و $d \in R^p$ و $f \in R^1$ به ترتیب بردارهای نامعلوم (ترم اغتشاشی) و بردار عیب سیستم هستند. ماتریس‌های A, B, C و D ماتریس‌های معمول سیستم بوده و ماتریس-

پرداخته شده و فرض شده که اطلاعات نویزی سیستم توسط یک فیلتر بلاگذر بهبود داده شده و یا نویز زیادی در محیط اندازه‌گیری سیستم مورد نظر وجود ندارد.

در صورتی که ما تخمینی از اطلاعات خروجی داشته باشیم که نسبت به اغتشاشات مقاوم بوده و فقط در بردارنده اطلاعات عیب باشد می‌توان روابط تحلیلی افزونگی را به صورت زیر بیان کرد که در حالت نرمال برابر صفر است.

$$\begin{aligned} ARR_h: \Phi(\hat{y}, \hat{y}, \hat{u}, \hat{u}, u, \theta) \\ = M_1(\theta)\hat{y}(t) + M_2(\theta)\hat{y}(t) \\ + M_3(\theta)\hat{y}(t) + N_1(\theta)\hat{u}(t) \\ + N_2(\theta)\hat{u}(t) + N_3(\theta)u(t) \end{aligned} \quad (3)$$

این رابطه مشابه رابطه (۲) بوده و مانده مربوطه با Φ نمایش داده شده است. تنها تفاوت این رابطه نسبت به رابطه شماره (۲) استفاده از تخمین خروجی به جای خود خروجی است. همچنین با توجه به اینکه اطلاعات ورودی قابل دسترسی در نظر گرفته شده است در رابطه فوق از u استفاده شده است.

لذا با توجه به اینکه روابط (۲) و (۳) که به ترتیب بر حسب خروجی مستقیم و تخمین خروجی بیان شده‌اند در حالت نرمال صفر بوده، با تفاضل این دو رابطه می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} ARR - ARR_h: M_1(\theta)(\dot{y}(t) - \hat{y}(t)) \\ + M_2(\theta)(\dot{y}(t) - \hat{y}(t)) \\ + M_3(\theta)(y(t) - \hat{y}(t)) \\ + N_1(\theta)\dot{u}(t) + N_2(\theta)\dot{u}(t) \\ + N_3(\theta)u(t) - N_1(\theta)\dot{u}(t) \\ - N_2(\theta)\dot{u}(t) - N_3(\theta)u(t) \end{aligned} \quad (4)$$

با تعریف:

$$e_y = y - \hat{y}, \dot{e}_y = \dot{y} - \dot{\hat{y}}, \ddot{e}_y = \ddot{y} - \ddot{\hat{y}} \quad (5)$$

با جایگذاری معادله (۵) در معادله (۴) به رابطه (۶) خواهیم رسید که بر حسب خطای تخمین خروجی بیان شده و به نام روابط تحلیلی افزونگی بر حسب خطا^۱ ($EARR$) نامگذاری شده است [۲۱ و ۲۲].

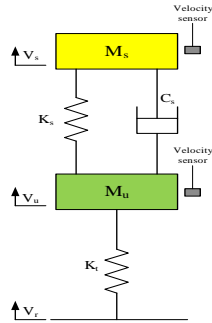
$$EARR: M_1(\theta)\ddot{e}(t) + M_2(\theta)\dot{e}(t) + M_3(\theta)e(t) \quad (6)$$

تاثیر ورودی و خروجی بصورت مستقیم در این روابط حذف شده ولی بصورت غیر مستقیم بواسطه مشاهده‌گر مورد استفاده روی سیستم تشخیص عیب پیشنهادی تاثیرگذار هستند. این صورت از روابط تحلیلی افزونگی شکل ساده‌تری داشته و منجر به کارایی بهتر و بهبود مقاوم بودن سیستم تشخیص عیب خواهد شد مشروط بر اینکه مشاهده‌گر به نحو مناسبی خطای تخمین خروجی حساس به عیب و غیر حساس به اغتشاشات را تولید نماید. در بخش ۳ به بررسی طراحی این مشاهده‌گر پرداخته می‌شود.

آشکارسازی عیب در روش پیشنهادی در اینجا مبتنی بر روابط تحلیلی افزونگی بر حسب خطای تخمین خروجی است که وابسته به پارامترهای مدل باندگراف سیستم است. تولید یک مانده مقاوم نسبت به عدم قطعیت پارامتری با استفاده از آستانه‌های تطبیقی در [۲۳] ارایه

² Uncertain Analytical Redundancy Relations

¹ Error-based Analytical Redundancy Relations

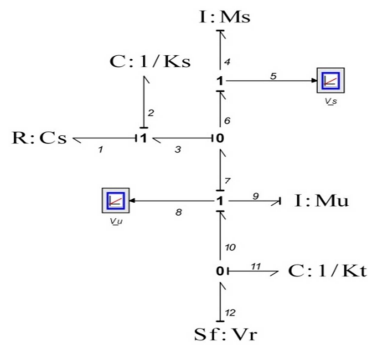


شکل ۱- سیستم تعلیق فعال خودرو

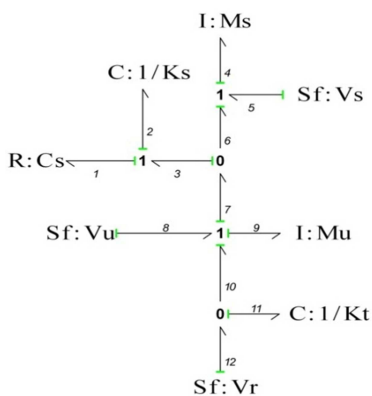
جدول ۱- پارامترهای سیستم تعلیق فعال خودرو و مقادیر آنها [۲]

پارامتر	تعریف	مقدار
M_s	جرم معلق (جرم بدنه خودرو)	۲۹۰ کیلوگرم
M_u	جرم نامعلق (چرخ)	۵۹ کیلوگرم
K_s	ضریب سختی سیستم تعلیق	۱۶۸۰۰ نیوتن بر متر
K_t	ضریب سختی لاستیک	۱۹۰۰۰ نیوتن بر متر
C_s	ضریب میرایی میراکننده	۱۰۰۰ نیوتن - ثانیه بر متر

مدل باندگراف سیستم فوق در علیت انتگرالی و مشتقی در نرم افزار 20-sim به ترتیب در شکل های ۲ و ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲- مدل باندگراف سیستم تعلیق فعال خودرو در نرم افزار 20-sim در علیت انتگرالی



شکل ۳- مدل باندگراف سیستم تعلیق فعال خودرو در نرم افزار 20-sim در علیت مشتقی

های توزیع اغتشاش و عیب در معادله حالت و معادله خروجی به ترتیب با E_d, E_f, G_d و G_f نمایش داده شده است.

مشاهده گر ورودی نامعلوم طبق [۱۳] بصورت زیر قابل بیان است:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Fz(t) + Tbu(t) + Ky(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) + Hy(t) \end{cases} \quad (11)$$

که در آن $\hat{x}(t) \in R^n$ بردار حالت تخمین زده شده و $z(t) \in R^n$ بردار حالت مشاهده گر است. ماتریس های F, T, K و H ماتریس های طراحی مشاهده گر هستند.

با محاسبه خطای تخمین حالت طبق [۱۳]، روابط زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned} (HC - I)E &= 0 \\ T &= I - HC \\ F &= A - HCA - K_1C \end{aligned} \quad (12)$$

$$K_2 = FH$$

$$K = K_1 + K_2$$

در صورتی که مقادیر ویژه ماتریس F همگی پایدار باشند حالت تخمین زده شده غیرحساس به ورودی نامعلوم به حالت سیستم واقعی میل می کند.

همچنین این نکته قابل ذکر است که دو شرط زیر باید برای وجود مشاهده گر ورودی نامعلوم برقرار باشد [۱۳].

الف - مرتبه $(CE) =$ مرتبه (E)

ب- زوج $(A_1 = TA, C_1)$ آشکارپذیر باشد.

در نهایت، سیستم آشکارساز عیب پیشنهادی با تلفیق اطلاعات خطای تخمین خروجی در EARRها طبق رابطه (۶) قابل دستیابی است. EARRها نقش مانده ها را ایفا کرده و اطلاعات خطای تخمین خروجی خود را از مشاهده گر ورودی نامعلوم دریافت می کند.

۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش به منظور نمایش کارآمدی روش پیشنهادی از یک مدل سیستم تعلیق فعال خودرو طبق [۲] استفاده شده است. معادلات فضای حالت و ARRها از مدل باندگراف سیستم استخراج شده و مشاهده گر مورد نظر طبق معادلات فضای حالت استخراجی طراحی می شود. صورت جدید روابط تحلیلی افزونگی یعنی EARRs به سادگی از ARRها قابل استخراج است و به منظور آشکارسازی و جداسازی عیب بکار گرفته می شوند. در ادامه روش پیشنهادی با روش معمول تشخیص عیب مبتنی بر باندگراف (استفاده از ARRها) مقایسه خواهد شد. یک سیستم تعلیق فعال خودرو طبق شکل ۱ را همراه با پارامترها و مقادیر بیان شده طبق جدول ۱ در نظر بگیرید.

$$UEARR2: \left| \delta M_s \frac{d^2 e_s}{dt^2} \right| + \left| \delta C_s \frac{de_u}{dt} \right| + \left| \delta C_s \frac{de_s}{dt} \right| + \left| \delta K_s e_u \right| + \left| \delta K_s e_s \right| \quad (18)$$

مقدار معمول برای عدم قطعیت نسبی پارامترهای مدل باندگراف طبق [۲۴] ۲ درصد در نظر گرفته می‌شود.

ماتریس‌های مربوط به مشاهده‌گر ورودی نامعلوم بصورت زیر بدست می‌آید:

$$H = \begin{bmatrix} 290 & 0 \\ 0 & 0 \\ 145 & 0 \\ -145 & 0 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0 & 1 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2.9985 & -0.0496 & 0 & 0 \\ -0.1218 & -0.0021 & 0 & 0 \\ 1.1218 & 0.0021 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 0 \\ 4.0597e5 & 8385 & -16800 & 190000 \\ 5573 & 340.59 & -8400 & 0 \\ -5569 & -340.59 & 8400 & 0 \end{bmatrix}$$

همچنین مقادیر ویژه ماتریس F در $v = [-3 \ -4 \ -5 \ -6]$ جایگذاری شده است.

شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار Matlab/Simulink انجام شده و با تعریف معیارهای مختلف مانده‌ها طبق روابط زیر [۲۵]، روش پیشنهادی با روش معمول مورد مقایسه قرار گرفته است. روش معمول مانده‌ها به عنوان یک روش پرکاربرد مبتنی بر باندگراف در مراجع متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۲۸-۲۶].

$$ITASR = \int (r^2 t) dt \quad (19)$$

$$ITAR = \int |r| t dt \quad (20)$$

$$IAR = \int |r| dt \quad (21)$$

که در آنها r سیگنال مانده سیستم تشخیص عیب بوده که در روش معمول با استفاده از باندگراف، ARRها و در روش پیشنهادی، EARRها به عنوان سیگنال مانده در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه به بررسی نتایج دو حالت بدون عیب و وقوع عیب در حضور اغتشاش در سیستم پرداخته می‌شود.

حالت ۱: حالت اغتشاشی در شرایط بدون عیب

در این حالت فرض شده که اغتشاش به سیستم وارد شده ولی عیبی در سیستم رخ نداده است. در این شرایط مانده‌ها باید مقادیر کوچکی داشته باشند یا به عبارت دیگر نسبت به اغتشاشات وارده به سیستم مقاوم باشند. مانده‌های بدست آمده از روش پیشنهادی در شکل ۴ نمایش داده شده است.

با در نظر گرفتن حالت‌های سیستم انتگرال تلاش‌های سلفی و انتگرال پیشروی‌های مانده‌های خازنی [۳]، معادلات فضای حالت سیستم با در نظر گرفتن مدل باندگراف با علیت انتگرالی بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{C_s}{M_s} & \frac{C_s}{M_u} & K_s & 0 \\ \frac{C_s}{M_s} & -\frac{C_s}{M_u} & -K_s & K_t \\ -\frac{1}{M_s} & \frac{1}{M_u} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_u} & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_u} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

در معادله حالت قبل، حالت‌ها، خروجی‌ها و ورودی سیستم بصورت زیر تعریف شده است:

$$x = \begin{bmatrix} p_4 \\ p_9 \\ q_2 \\ q_{11} \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} V_s \\ V_u \end{bmatrix}, u = V_r$$

که در آن V_r پروفایل جاده بوده و V_s و V_u دو حسگر اندازه‌گیری سرعت بوده که سرعت جرم معلق و نامعلق را اندازه‌گیری می‌نمایند. دیگر ماتریس‌های سیستم بصورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$E_d = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0 \\ 0.1 \\ -0.1 \end{bmatrix}, E_f = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.5 \\ 0.1 \\ 0.2 \end{bmatrix}, G_d = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.6 \end{bmatrix}, G_f = \begin{bmatrix} 0.7 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

با در نظر گرفتن مدل باندگراف با علیت مشتقی روابط تحلیلی افزونگی با روش معکوس کردن علیت^۱ طبق [۳] بصورت زیر استخراج می‌شوند:

$$ARR1: M_u \frac{d^2 V_u}{dt^2} + C_s \frac{dV_u}{dt} - C_s \frac{dV_s}{dt} + (K_s + K_t)V_u - K_s V_s - K_t V_r \quad (13)$$

$$ARR2: M_s \frac{d^2 V_s}{dt^2} - C_s \frac{dV_u}{dt} + C_s \frac{dV_s}{dt} - K_s V_u + K_s V_s \quad (14)$$

بنابراین، EARRها به راحتی طبق معادله (۶) بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$EARR1_n: M_u \frac{d^2 e_u}{dt^2} + C_s \frac{de_u}{dt} - C_s \frac{de_s}{dt} + (K_s + K_t)e_u - K_s e_s \quad (15)$$

$$EARR2_n: M_s \frac{d^2 e_s}{dt^2} - C_s \frac{de_u}{dt} + C_s \frac{de_s}{dt} - K_s e_u + K_s e_s \quad (16)$$

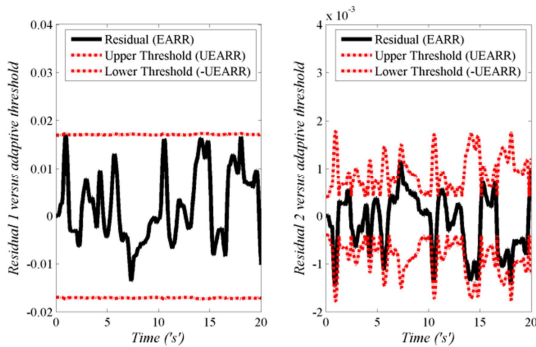
آستانه‌های تطبیقی مبتنی بر EARRها نیز بصورت روابط (۱۷) و (۱۸) قابل دستیابی است:

$$UEARR1: \left| \delta M_u \frac{d^2 e_u}{dt^2} \right| + \left| \delta C_s \frac{de_u}{dt} \right| + \left| \delta C_s \frac{de_s}{dt} \right| + \left| \delta K_s e_u \right| + \left| \delta K_t e_u \right| + \left| \delta K_s e_s \right| \quad (17)$$

¹. Causality Inversion Method

ورودی مستقیماً روی مانده‌ها تأثیرگذار نیست چنین نتایج بدست آمده است.

همچنین مقادیر مانده‌ها در مقایسه با آستانه‌های تطبیقی تعریف شده در شکل ۶ نمایش داده شده است.



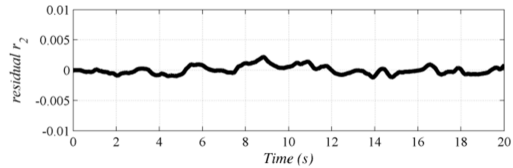
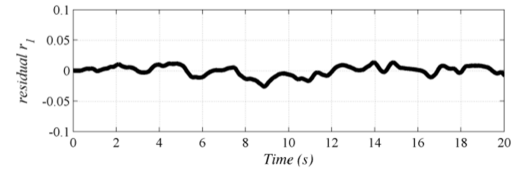
شکل ۶- مانده‌ها و آستانه‌های تطبیقی در حالت بدون عیب

همانگونه که دیده می‌شود مانده‌ها در محدوده‌های بدست آمده از آستانه‌های تطبیقی قرار گرفته‌اند و عیبی آشکارسازی نمی‌شود. همچنین تأثیر اغتشاش بخوبی در سیستم تشخیص عیب از بین رفته است. در روش معمول بواسطه حضور اغتشاش، مانده‌ها از مقادیر آستانه‌های تعریف شده فراتر خواهند رفت.

حالت ۲: حالت معیوب

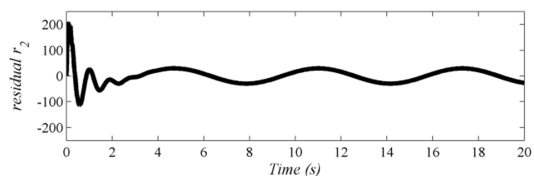
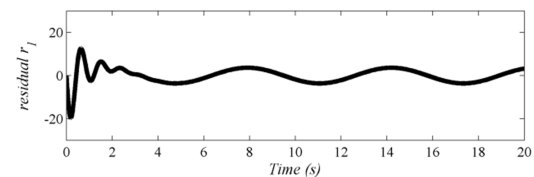
عیب‌های مختلف با استفاده از مدل فضای حالت یا مدل باندگراف قابل اعمال به سیستم هستند. در این مقاله دو سناریوی تزریق عیب به سیستم در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول یک عیب سیستمی در ضریب سختی سیستم تعلیق فعال در نظر گرفته شده است و نتایج شبیه‌سازی در حضور اغتشاشات بیان شده است. عیب تزریقی در مدل باندگراف سیستم لحاظ شده است. در سناریوی دوم یک عیب تدریجی به عنوان f طبق رابطه (۷) به سیستم اعمال شده است. عیب تزریق شده در معادلات فضای حالت سیستم منظور شده است. ذکر این نکته ضروری است که نمایش فضای حالت سیستم نیز از مدل باندگراف آن استخراج شده و نتایج حالت‌ها و خروجی‌ها کاملاً یکسان هستند و تنها تفاوت بین این دو مدل در شبیه‌سازی، امکان اعمال مناسبتر عیب‌های مختلف است.

در سناریوی اول تزریق عیب، یک عیب ناگهانی با اندازه ۱۰ درصد مقدار نامی در سختی سیستم تعلیق (K_s) در نظر گرفته شده است. عیب در زمان ۵ ثانیه رخ داده است. نتایج بدست آمده برای مانده‌ها طبق روش پیشنهادی و روش معمول به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ رسم شده است.



شکل ۴- مقادیر مانده‌ها در حالت اغتشاشی بدون عیب با روش پیشنهادی (استفاده از EARRها)

مانده‌های بدست آمده از روش معمول در شکل ۵ نمایش داده شده است.



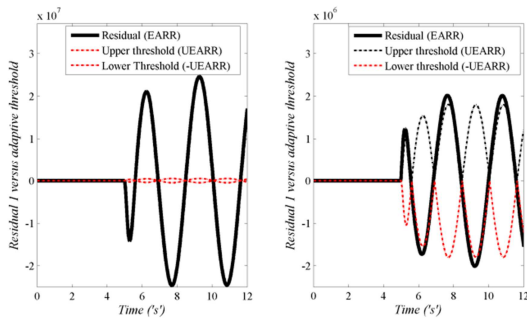
شکل ۵- مقادیر مانده‌ها در حالت اغتشاشی بدون عیب با روش معمول (استفاده از ARRها)

به منظور مقایسه بهتر روش پیشنهادی و روش معمول، مقادیر مختلف مانده‌ها طبق روابط (۱۴) تا (۱۶) در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲- معیارهای مختلف مانده‌ها برای روش معمول (ARR) و روش پیشنهادی (EARR) برای حالت بدون عیب در حضور اغتشاش

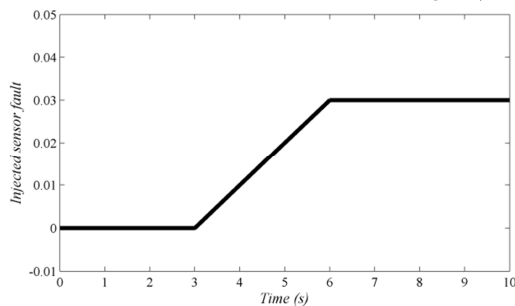
ITAR	IAR	ITASR	
73.84	50.2	721.4	مانده اول از روش ARR
0.2971	0.0562	0.0026	مانده اول از روش EARR
137.5	40.8	1167	مانده دوم از روش ARR
0.0244	0.0046	1.836e-5	مانده دوم از روش EARR

با توجه به مقادیر مانده‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ و همچنین نتایج بیان شده در جدول ۲، تأثیر اغتشاش روی مانده‌ها در روش پیشنهادی به خوبی بهبود یافته است و به عبارت دیگر سیستم تشخیص عیب غیرمقاوم نسبت به اغتشاش بدست آمده است. معیار مقاوم بودن نسبت به اغتشاش در روش معمول لحاظ نشده و در اینجا با استفاده از مشاهده‌گر مورد استفاده این شرایط به سیستم تشخیص عیب اضافه شده است. همچنین همانگونه که در شکل فوق دیده می‌شود مانده‌ها در روش معمول مقادیر قابل توجهی بوده و شکل سینوسی ورودی را نیز در خود دارد. به عبارت دیگر با توجه به اینکه در روش پیشنهادی



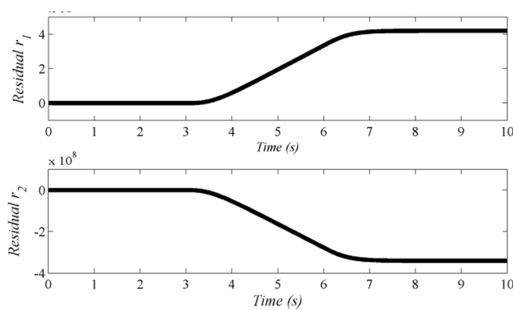
شکل ۹- مانده‌ها و آستانه‌های تطبیقی در حالت وقوع عیب f_1

در سناریوی دوم یک عیب بصورت تدریجی بصورت شکل ۱۰ به سیستم اعمال شده است.



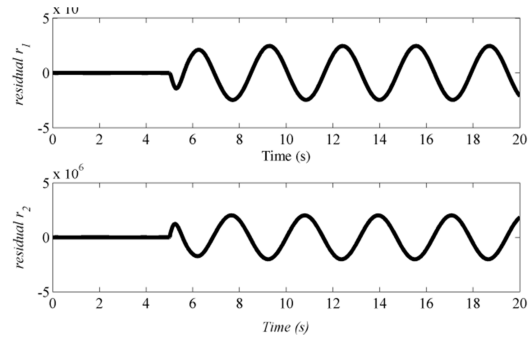
شکل ۱۰- پروفایل عیب تدریجی اعمالی

مانده‌های بدست آمده از روش پیشنهادی با تلفیق باندگراف و مشاهده‌گر ورودی نامعلوم بصورت شکل ۱۱ بیان شده است:

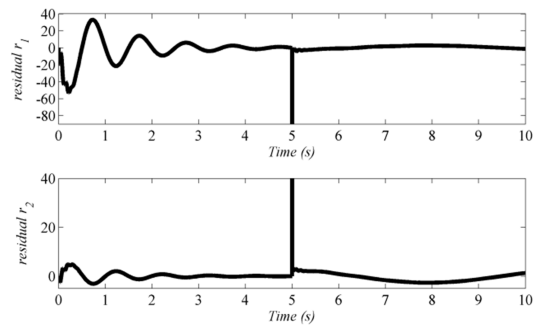


شکل ۱۱- مانده‌های بدست آمده از روش پیشنهادی برای عیب تدریجی اعمالی

همچنین مانده‌های بدست آمده از روش معمول (ARRs) بصورت شکل ۱۲ نمایش داده شده است:



شکل ۷- مقادیر مانده‌ها در حالت وقوع عیب و در حضور اغتشاش در روش پیشنهادی (استفاده از EARRs)



شکل ۸- مقادیر مانده‌ها در حالت وقوع عیب و در حضور اغتشاش در روش معمول (استفاده از ARRها)

همچنین نتایج بدست آمده برای معیارهای مختلف مانده‌ها بصورت عددی در جدول ۳ بیان شده است.

جدول ۳- معیارهای مختلف مانده‌ها برای روش معمول (ARR) و روش پیشنهادی (EARR) برای عیب سیستمی آبی اعمالی

	ITAR	IAR	ITASR	
مانده اول از روش	99.12	54.05	6059	ARR
مانده اول از روش	1.596e8	2.09e7	8.35e14	EARR
مانده دوم از روش	198.1	48.98	6949	ARR
مانده دوم از روش	1.292e7	1.703e6	5.507e12	EARR

همانگونه که از جدول فوق دیده می‌شود مقادیر مانده‌ها در دو روش نسبت به حالت بدون عیب بزرگتر است. مقادیر مانده‌ها در روش پیشنهادی به مراتب بزرگتر بوده که به منزله حساسیت بالای سیستم تشخیص عیب پیشنهادی است.

مقایسه مانده‌های بدست آمده با آستانه‌های تطبیقی تعریف شده در شکل ۹ نمایش داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود سیستم تشخیص عیب وقوع عیب را به خوبی در حضور اغتشاش و عدم قطعیت پارامتری آشکارسازی نموده است.

عملکرد بسیار مناسبی در آشکارسازی عیب و تضعیف اغتشاش دارد و بصورت همزمان شرط حساسیت عیب و مقاوم بودن در برابر اغتشاش و عدم قطعیت پارامتری را به خوبی داراست. جداسازی عیب نیز می‌تواند با تشکیل ماتریس علایم عیب با استفاده از EARRها صورت گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

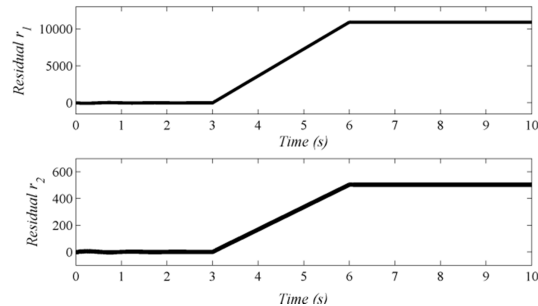
در این مقاله یک روش جدید آشکارسازی عیب مبتنی بر تلفیق باندگراف و مشاهده‌گر ورودی نامعلوم ارایه شده است. روش پیشنهادی با بهره‌گیری از مزایای روش باندگراف و مشاهده‌گر ورودی نامعلوم عملکرد بسیار مناسبی دارد. استفاده از روش باندگراف منجر به حساسیت عیب بالا و مقاوم بودن نسبت به عدم قطعیت پارامتری و استفاده از مشاهده‌گر ورودی نامعلوم منجر به مقاوم بودن و حذف اثر اغتشاش در سیستم تشخیص عیب شده است. به منظور تلفیق باندگراف با مشاهده‌گر ورودی نامعلوم فرم جدیدی از روابط تحلیلی افزونگی بر حسب خطای تخمین خروجی معرفی شده و به عنوان مانده‌های سیستم تشخیص عیب بکار برده شده است. خطای تخمین خروجی مورد استفاده در روابط تحلیلی افزونگی بر حسب خطا از مشاهده‌گر ورودی نامعلوم گرفته می‌شود که نسبت به اغتشاشات وارده به سیستم مقاوم است. همچنین آستانه‌های تطبیقی مبتنی بر این روابط به منظور آشکارسازی عیب محاسبه شده است. مزیت دیگر روش پیشنهادی، امکان جداسازی و شناسایی مناسب عیب با استفاده از روابط تحلیلی افزونگی بر حسب خطا است. روش پیشنهادی روی یک سیستم تعلیق فعال خودرو پیاده‌سازی شده و با بیان معیارهای مختلف مانده‌ها عملکرد مناسب آن در حذف اثر اغتشاش و حساسیت عیب بالا در حضور عدم قطعیت پارامتری نمایش داده شده است.

۶- مراجع

- [1] Zhang Y., Jiang J., Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, *Annual Reviews in Control*, Vol. 32, No. 2, pp. 229-252, 2008.
- [2] Wang, D., Yu, M., Low C. B. and Aragoiti S., *Model-Based Health Monitoring of Hybrid Systems*. Springer, 2013.
- [3] Samantaray, A. K. and Ould Bouamama, B. *Model-based Process Supervision*. Springer, 2008
- [4] Karnopp, D. C., Margolis, D. L. and Rosenberg R. C., *System Dynamics Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*, 4th ed. Wiley, 2006.
- [5] Sanchez, R., Medina A., Wind turbine model simulation: A bond graph approach, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 41, pp. 28-45, 2014.
- [6] Ould Bouamama B., Medjaher K., Samantaray A. K., Staroswiecki M., Supervision of an industrial steam generator. Part I: Bond graph modeling, *Control Engineering Practice*, Vol. 14, No.1, pp. 71-83, 2006.

[۷] جهان‌بین ز. سلک غفاری ع.، مقداری ع. و ابراهیمی ع.، مدلسازی دینامیکی یک ربات بالزن با استفاده از روش باندگراف. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۵، ش. ۲، ص ۱۳-۲۲، ۱۳۹۴.

- [8] Benmoussa S., Bouamama B. C., Merzouki R., Bond Graph Approach for Plant Fault Detection and Isolation: Application to Intelligent Autonomous



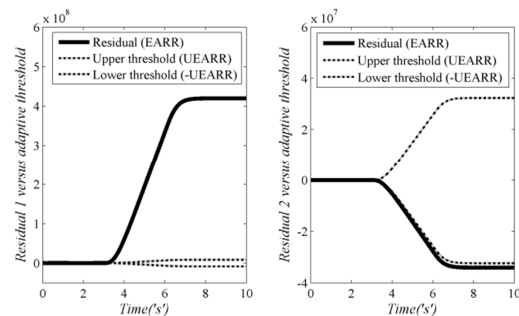
شکل ۱۲- مانده‌های بدست آمده از روش معمول (ARRs) برای عیب تدریجی اعمالی

با مقایسه شکل ۱۱ و ۱۲ می‌توان حساسیت بسیار مناسب روش پیشنهادی به عیب‌های اعمالی به سیستم را نسبت به روش معمول نتیجه گرفت. معیارهای مختلف مانده‌ها در این حالت مطابق جدول ۴ است:

جدول ۴- معیارهای مختلف مانده‌ها برای روش معمول (ARR) و روش پیشنهادی (EARR) برای عیب تدریجی اعمالی

ITAR	IAR	ITASR	
4.304e5	5.997e4	4.422e9	مانده اول از روش ARR
1.531e11	2.051e10	5.937e20	مانده اول از روش EARR
1.99e4	2795	9.419e6	مانده دوم از روش ARR
1.253e10	1.685e9	3.955e18	مانده دوم از روش EARR

مقادیر بزرگتر در جدول‌های ۳ و ۴ به منزله حساسیت بیشتر سیستم تشخیص عیب به عیب رخ داده است. همانگونه که نتایج بیان شده در جدول‌های فوق نشان می‌دهند روش پیشنهادی حساسیت بسیار بالایی به عیب رخ داده در سیستم دارد که به عنوان یکی از ویژگی‌های مورد توجه در سیستم‌های تشخیص عیب است. مانده‌های بدست آمده از تزریق عیب تدریجی همراه با آستانه‌های مربوطه در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳- مانده‌ها و آستانه‌های تطبیقی در حالت وقوع عیب f2

همانگونه که از شکل فوق دیده می‌شود، سیستم تشخیص عیب وقوع عیب را به خوبی در حضور اغتشاش و عدم قطعیت پارامتری آشکارسازی نموده است. همانگونه که از نتایج بدست آمده دیده می‌شود روش پیشنهادی

Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 226, No. 8, pp. 1013-1028, 2012.

- [25] Kazemi M. G., Montazeri M., Asgari S., Incipient Fault Detection based on bond graph method and different criteria of residuals, In *23rd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran*, 2015.
- [26] Borutzky W., Determination of a Function for a Degradation Process by Means of Two Diagnostic Bond Graphs. *IFAC-PapersOnLine*, Vol.51, No.24, pp. 636-642, 2018.
- [27] Kumar S., Dasgupta K., Ghoshal S. K. Fault diagnosis and prognosis of a hydro-motor drive system using priority valve. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019.
- [28] Ben-Ali S., Modeling of a double effect evaporator: Bond graph approach. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol.138, pp. 554-567, 2018.
- Vehicle, *IEEE Transactions on Automatic Science and Engineering*, Vol.11, No.2, pp. 585-593, 2014.
- [9] Djeziri M. A., Merzouki R., Ould Bouamama B., Dauphin Tanguy G., Robust Fault Diagnosis by Using Bond Graph Approach, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.12, No.6, pp. 599-611, 2007.
- [10] Cauffriez L., Grondel S., Loslever P., Aubrun C., Bond Graph modeling for fault detection and isolation of a train door mechatronic system, *Control Engineering Practice*, Vol. 49, pp.212-224, 2016.
- [11] Benallel M., Haffaf H., Meghebbar A., Sensor placement for monitoring systems modelled by Bond Graph, *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, Vol.64, No.1, pp. 105, 2016.
- [12] Sanei, A., Novinzadeh A. B., and Habibi M.. Addition of momentum and kinetic energy effects in supersonic compressible flow using pseudo bond graph approach. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. Vol.20, No.5, pp. 491-503, 2014.
- [13] Chen J. and Patton R. J., *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Springer 1999.
- [۱۴] هاشمی م، کمالی ایگلی ع، نراقی م، مشاهده‌گر تخمین عیب با وجود ورودی نامعلوم نامنطبق برای سیستم‌های خطی. مهندسی مکانیک مدرس، د. ۱۶، ش. ۹، ص ۴۲۹-۴۳۶، ۱۳۹۵.
- [15] Ziyabari S. H. S., Shoorehdeli M. A., Robust fault diagnosis scheme in a class of nonlinear system based on UIO and fuzzy residual, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol.15, No.3, pp. 1145-1154., 2017.
- [16] Kazerooni M., Khayatian A., Safavi A., Fault estimation for a class of interconnected non-linear systems with time-varying delay using robust adaptive unknown input observers, *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 2016.
- [17] Tahraoui S., Meghabbar A., Boubekeur D., Unknown input observer based on LMI for robust generation residuals, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol.25, No.1, pp. 95-107, 2017.
- [18] Asgari S., Yazdizadeh, A., Robust model-based fault diagnosis of mechanical drive train in V47/660 kW wind turbine. *Energy Systems*, Vol. 9, No.4, pp. 921-952, 2018.
- [19] Hwang I., Kim S., Seah C. E., A Survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 636-653, 2010.
- [20] Ghoshal S. K., Samanta S., Robust Fault Diagnosis and Prognostics of a Hoisting Mechanism: a Simulation Study, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 962-979, 2011.
- [21] Kazemi M.G., Montazeri M., A new robust fault diagnosis approach based on bond graph method. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39, No.11, pp. 4353-4365, 2017.
- [22] Kazemi M. G., Montazeri M., Fault Detection of continuous time linear switched systems using combination of Bond Graph method and switching observer, *ISA transactions*, 2019.
- [23] Kam C. S., Dauphin-Tanguy G. Bond graph models of structured parameter uncertainties. *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 342, No.4, pp. 379-399, 2005.
- [24] Ghoshal S. K., Samanta S., Samantaray A K., Robust fault detection and isolation of hybrid systems with uncertain parameters, *Proceedings of the Institution of*