

آشکارسازی و جایابی عیب مقاوم به عدم قطعیت برای سیستم‌های تراکم‌پذیر به روش باند گراف

احمد صانعی^۱، علیرضا باصحبت نوین زاده^۲

^۱ دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، گروه دینامیک پرواز، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، asanei@mail.kntu.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، گروه دینامیک پرواز، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، novinzadeh@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۲/۶/۱۴، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۲/۸/۲۵)

چکیده: به دلیل غیرخطی بودن سیستم‌های تراکم‌پذیر، شناسایی عیب مقاوم به عدم قطعیت برای این نوع سیستم‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله مدل باند گراف به فرم LFT، برای دستگاه‌های تراکم‌پذیر توسعه داده می‌شود. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که خواص علی باند گراف می‌تواند برای به دست آوردن روابط افزونگی تحلیلی، در حضور عدم قطعیت‌ها مورد استفاده قرار گیرد. مزیت استفاده از باند گراف به فرم LFT، جدا کردن روابط افزونگی تحلیلی معین از روابط افزونگی نامعین است. روابط افزونگی تحلیلی معین برای محاسبه باقیمانده‌ها، و روابط افزونگی تحلیلی نامعین برای محاسبه آستانه تطبیقی و آنالیز حساسیت باقیمانده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پایان، مدل‌های توسعه داده شده، از طریق یک مثال آموزشی اعتبار سنجی می‌شوند.

کلمات کلیدی: باند گراف، آشکارسازی و جایابی عیب، روابط افزونگی تحلیلی، عدم قطعیت، سیال تراکم‌پذیر.

Robust Fault Detection and Isolation to Compressible Systems Using Bond Graph Approach

Ahmad Sanei, Alireza Basohbat Novinzadeh

Abstract: In the papers published on Fault Detection and Isolation (FDI) using Bond Graph approach, robust FDI in the compressible flow systems has less been developed in the literature, due to the strong nonlinearities in this systems. In this paper, Bond Graph model in LFT form is developed for compressible systems. The results of this research are shown the causal properties of bond graph can be used to obtain the Analytical Redundancy Relations (ARRs) in presence of parameter uncertainties. The advantage of the bond graph model in LFT form is generation of ARRs and decoupling of the nominal part from the uncertain part. The nominal part can be used to calculate of the residual and the uncertain part can be used to obtain of adaptive thresholds and sensitivity analysis. In the following, the developed model is validated by pedagogical example.

Keywords: Bond Graph, Fault Detection and Isolation (FDI), Analytically Redundancy Relations (ARRs), Uncertainties, Compressible fluid.

مختلفی برای آشکارسازی و جایابی عیب پیشنهاد شده است که می‌توان آنها را به دو دسته بر مبنای مدل^۲ و بدون مبنای مدل^۳ تقسیم‌بندی نمود [۱-۳].

۱- مقدمه

امروزه روش‌های آشکارسازی و جایابی عیب (FDI)^۱ به‌طور گسترده‌ای در سیستم کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های

2. Model based
3. Non-Model based

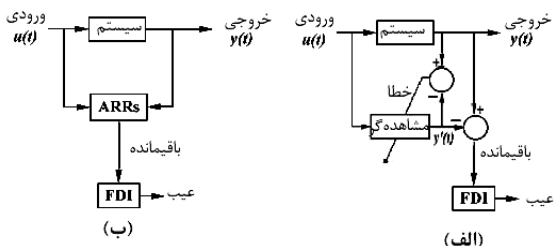
1. Fault Detection & Isolation (FDI)

باقیمانده‌ها و از قسمت نامعین جهت به دست آوردن آستانه‌های تطبیقی استفاده می‌شود.

از طرف دیگر از آنجایی که روش باند‌گراف یک روش گرافیکی است که معادلات حالت را به‌صورت سیستماتیک استخراج می‌کند و نرم‌افزارهای زیادی در این خصوص ارائه شده‌اند (2000 Symbols [11], 20-Sim [12]، و Ms1 [13])، مدل توسعه داده شده در این مقاله قابل اجرا در نرم‌افزارهای فوق نیز خواهد بود. در پایان نیز مدل توسعه داده شده در قالب یک مثال ساده و توسط نرم‌افزار 20Sim اعتبار سنجی می‌شود.

۲- روابط افزونگی تحلیلی (ARRs)

در شناسایی و جایابی عیب (FDI)، دو دیدگاه وجود دارد. در دیدگاه اول در هر بار نمونه‌برداری، ورودی به مدل داده و خروجی مدل محاسبه می‌گردد. اختلاف خروجی مدل و سیستم واقعی، به‌عنوان باقیمانده به‌دست می‌آید (شکل ۱ الف)). زمان این محاسبه بسته به ابعاد سیستم، غیرخطی بودن و پیچیدگی مدل ممکن است به‌قدری زیاد باشد که امکان محاسبه به هنگام^۵ وجود نداشته باشد. اینجاست که از دیدگاه دوم یا استفاده از روابط افزونگی تحلیلی موسوم به ARRs استفاده می‌شود. در این روش قیدهای سیستمی به‌گونه‌ای نوشته می‌شوند که فقط شامل متغیرهای معلوم باشند. به عبارت دیگر ARRs قیدهای استاتیکی و دینامیکی هستند که مقادیر معلوم (شامل پارامترها، ورودی‌های خروجی‌های اندازه‌گیری شده) را به‌همدیگر مرتبط می‌کند (شکل ۱ ب)).



شکل ۱: دو دیدگاه مختلف برای تولید باقیمانده

در این مقاله برای شناسایی عیب از دیدگاه دوم استفاده شده است، که لازمه آن داشتن روابط افزونگی تحلیلی (ARRs) است. همچنین برای استخراج ARRs بادر نظر گرفتن عدم قطعیت، از روش باند‌گراف استفاده می‌شود.

در روش باند‌گراف متغیرهای شناخته شده به چند دسته تقسیم می‌شوند. منابع (S_e و S_f)، منابع تعدیل شده (MS_e و MS_f)، مقادیر اندازه‌گیری شده از سنسورها (D_e و D_f) و پارامترها و ورودی‌های سیستم (θ و u). بنابراین:

هر یک از دو روش فوق، به دو روش کیفی^۱ و کمی^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. اگر ساختار کلی مدل معلوم اما پارامترهای مدل نامعلوم و یا دارای عدم قطعیت زیادی باشد روش کیفی، و درغیراین‌صورت روش کمی پیشنهاد می‌گردد. از طرف دیگر در سیستم‌های واقعی، به دلیل وجود نویزهای اندازه‌گیری، اغتشاشات سیستم، تیرانسیهای ساختی و یا اشتباه در تخمین پارامترها، عدم قطعیت صفر وجود ندارد. بنابراین برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها، ابتدا لازم است مدل دقیقی از سیستم را با در نظر گرفتن عدم قطعیت به دست آورد. بر این اساس، حدود بالا و پایین ناشی از عدم قطعیت‌های پارامتری در حدود آستانه اعلان عیب منتشر شده و آستانه‌ها شکل می‌گیرند. در این شرایط، زمانی که باقیمانده‌ها خارج از آستانه قرار گیرند، سیستم‌های هشداردهنده اعلان عیب، فعال می‌شوند.

گام اول در طراحی سیستم پایش بر مبنای مدل، به دست آوردن مدل ریاضی سیستم، عدم قطعیت‌ها است. روش‌های زیادی برای مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی پیشنهاد شده‌اند، اما در این میان روش باند‌گراف که بر اساس توازن انرژی کار می‌کند، یکی از کارآمدترین روش‌ها به شمار می‌رود. اگرچه این روش اولین بار در سال ۱۹۶۶ توسط پاینتر [۴] و به منظور مدل‌سازی و استخراج معادلات حالت سیستم‌های دینامیکی معرفی شد، اما بعداً توسط شاگردانش (کارنو) برای سیستم‌هایی که با حوزه‌های مختلف انرژی (مکانیکی، الکتریکی، شیمیایی، ترمودینامیکی و ...) سر و کار دارند، توسعه داده شد [۵]. در سال ۱۹۹۹ آقای دلفین-تانگوی از این روش برای تعیین کنترل‌پذیر و مشاهده‌پذیر بودن یک سیستم استفاده نمود [۶]. بعد از آن در سال ۲۰۰۱ روش باند‌گراف برای تشخیص و جایابی عیب توسعه یافت [۷، ۸]. اخیراً دجری و همکارانش روشی را برای تشخیص و جایابی عیب در حضور عدم قطعیت‌ها ارائه نموده‌اند، که به‌عنوان فرم LFT^3 شناخته شده است [۹، ۱۰]. مزیت باند‌گراف به فرم LFT این است که روابط افزونگی تحلیلی ($ARRs^4$) معین و نامعین به‌طور سیستماتیک از مدل باند‌گراف استخراج می‌شود. قسمت معین، همان $ARRs$ بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت است، که برای محاسبه باقیمانده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. قسمت نامعین نیز که شامل عدم قطعیت‌ها است، برای محاسبه آستانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مقالاتی که تاکنون در خصوص FDI به‌روش باند‌گراف منتشر شده، به عدم قطعیت در سیستم‌های تراکم‌پذیر پرداخته نشده است. بهمن دلیل در این مقاله، مدل عدم قطعیت به فرم LFT برای میدان نازل آیزنتروپیک و میدان ظرفیتی سیالات تراکم‌پذیر توسعه و نشان داده می‌شود که خواص علی باند‌گراف می‌تواند روابط افزونگی تحلیلی $ARRs$ را به‌گونه‌ای از فرم LFT استخراج کند که روابط افزونگی تحلیلی شامل قسمت معین و قسمت نامعین باشند. از قسمت معین جهت به دست آوردن

1. Qualitative
2. Quantitative
3. Linear fractional transformation
4. Analytically Redundancy Relations (ARRs)

ماتریس فوق یک ماتریس باینری $n \times (m+2)$ بوده که اعضا آن '0' و '1' هستند. در پرکردن درایه j ام ماتریس FSM $(i=1, \dots, n; j=1, \dots, m)$ در صورت وابستگی ARR_j به θ_i (یعنی اگر در رابطه ARR_j پارامتر θ_i ظاهر شده باشد) عدد '1' و در غیر این صورت عدد '0' درج می گردد.

تعریف ۱: گفته می شود عیب در پارامتر θ_i قابلیت آشکار شدن دارد، اگر و تنها اگر حداقل یکی از اعضای سطر i ام مخالف صفر باشد. توانایی آشکار سازی عیب در پارامتر θ_i ، در سطر i ام و ستون $m+1$ ام، با $M_b=1$ و عدم توانایی آشکار سازی عیب با $M_b=0$ نشان داده می شود.

$$S_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{if } i^{\text{th}} \text{ ARR is sensitive to faults in } j^{\text{th}} \text{ component} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

تعریف ۲: گفته می شود عیب در پارامتر θ_i قابلیت تفکیک پذیری دارد اگر و تنها اگر علامت عیب در سطر مربوط به θ_i منحصر به فرد باشد. توانایی تفکیک پذیری عیب در پارامتر θ_i ، در سطر i ام و ستون $m+2$ ام، با $I_b=1$ ، و عدم توانایی جایابی عیب با $I_b=0$ نمایش داده می شود.

جدول ۱: ماتریس تفکیک خطا (FSM)

	ARR1	...	ARRj	...	ARRm	Mb	Ib
θ_1							
θ_i			ij				
θ_n							

بعد از به دست آوردن ماتریس علامت عیب، لازم است بردار علامت عیب تعریف شود. بردار علامت عیب یک بردار باینری است که به صورت $\vec{C} = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ تعریف می شود که در آن هر جز از بردار $\vec{C}$ از قانون زیر تبعیت می کند:

$$c_i = \begin{cases} 1, & |c_i| > \varepsilon_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

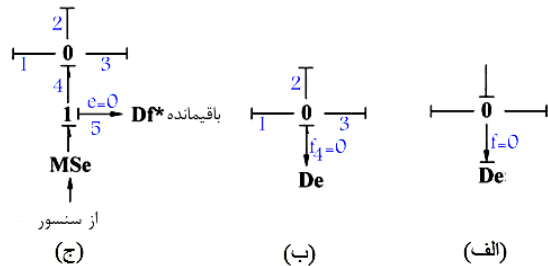
که در آن ε_i آستانه تطبیقی مربوط به ARR_i است. بنابراین اگر سیستم بدون عیب باشد، چون مقدار عددی باقیمانده ها کمتر از آستانه های مربوطه هستند بردار باینری $\vec{C}$ برابر صفر خواهد بود در غیر این صورت، بردار $\vec{C}$ یک بردار باینری غیر صفر است که از مقایسه این بردار با سطرهای ماتریس FSM خطا جایابی می شود.

۳- کنترل مقاوم

مطالعه و آنالیز کنترل مقاوم به عدم قطعیت، موضوع بسیاری از تحقیقات امروزی بوده است. دو مدل برای مطالعه کنترل مقاوم در سیستم های خطی مورد استفاده قرار می گیرد. اولین مدل به نام فرم کانونیک^۳ شناخته شده است. در این فرم، معادلات حالت برای سیستمی که دارای عدم قطعیت است، به صورت روابط (۲) نشان داده می شود:

$$ARR: f(D_e, D_f, S_e, S_f, MS_e, MS_f, u, \theta) = 0 \quad (1)$$

همان طور که در باند گراف رفتاری استفاده از خواص شاخص علیت^۱ نقش مهمی در به دست آوردن معادلات حالت داشتند، در استخراج ARR ها نیز از این خواص استفاده خواهد شد. اما بایستی توجه داشت هنگامی که از باند گراف رفتاری جهت استخراج معادلات حالت استفاده می شود، مقادیر اندازه گیری شده توسط سنسورها، به عنوان خروجی سیستم عمل می کنند. بنابراین در این حالت، شاخص های علیت برای سنسورهای اندازه گیری سعی، به صورت شکل ۲ (الف) نشان داده می شود [۱۴، ۱۵]. در حالی که وقتی از باند گراف برای جایابی عیب استفاده می شود، مقادیر اندازه گیری شده توسط سنسورها، به عنوان ورودی سیستم عمل کرده و متناسب با آن، مکان شاخص های علیت نیز تغییر خواهد یافت (شکل ۲ (ب)). از طرفی چون در سنسورها مصرف انرژی وجود ندارد، بنابراین در شکل ۲ (ب) مقدار پیشروی در باند ۴ صفر است یعنی: $f_4 = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^3 f_i = 0$



شکل ۲: (الف) سنسور سعی (ب) سنسور سعی در حالت معکوس شده (ج) سنسور مجازی برای تعیین باقیمانده

از این مفهوم برای تعریف سنسور مجازی که مقدار باقیمانده را محاسبه می کند استفاده می شود. سنسورهای مجازی، سنسورهایی هستند که ماهیت محاسباتی داشته و آنها را با علامت '*' نشان می دهند (شکل ۲ (ج)). در حالت ایده آل که سیستم در شرایط اسمی کار می کند، مقدار اندازه گیری شده توسط سنسور مجازی، برابر صفر است. ولی در حالتی که سیستم در حالت معیوب کار می کند، خروجی آنها یک باقیمانده خواهد داشت. بنابراین در شکل ۲ (ج) روابط افزونگی از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$ARR = f_5 = f_4 = 0 \Rightarrow ARR = \sum_{i=1}^3 f_i = 0 \quad (2)$$

همین استدلال در مورد سنسوری که شاخص علیت آن معکوس شده، ولی مقدار پیشروی را اندازه گیری می کند صادق است. در طراحی سیستم پایش و جایابی عیب، بعد از به دست آوردن روابط افزونگی تحلیلی، برای مطالعه توانایی آشکار سازی و جایابی عیب نیاز به تشکیل ماتریس علامت عیب FSM^۲ است. یک نمونه از ماتریس FSM برای حالتی که m سنسور و n پارامتر احتمالی معیوب در سیستم وجود دارد، در جدول ۱ نشان داده شده است:

۴- سیال تراکم‌پذیر

حجم کنترلی را در نظر بگیرید که سیال تراکم‌پذیر می‌تواند از مرزهای حجم کنترل عبور کند. در این حجم کنترل، انرژی منتقل شده به‌واسطه انتقال جرم، تابعی از نرخ جریان جرمی است. اما بایستی توجه داشت که از یک طرف، نرخ جریان جرمی منتقل شده از طریق مرزهای حجم کنترل، تابعی از نسبت فشار و خواص ترمودینامیکی جریان بالادست است. از طرف دیگر، خود خواص ترمودینامیکی نیز تابعی از نرخ خالص انرژی منتقل شده به حجم کنترل است. بنابراین در سیالات تراکم‌پذیر، جریان جرمی و نرخ تغییرات انرژی درون حجم کنترل، به همدیگر وابسته‌اند. کارنوپ و همکارانش بافرض جریان آیزنتروپیک، و به‌منظور محاسبه نرخ جریان جرمی که به حجم کنترل وارد (یا خارج) می‌شود، میدان نازل آیزنتروپیک R را در باندگراف معرفی نمودند. همچنین به منظور ارضاء قوانین بقای جرم و انرژی درون حجم کنترل، میدان ظرفیتی C را در باندگراف معرفی نمودند. میدان‌های معرفی شده شامل پارامترهای اسمی هستند و بدیهی است که در مدل‌های معرفی شده عدم قطعیت پارامتری منظور نشده‌است. در بخش‌های پنجم و ششم این مقاله، و به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، مدل باندگراف به‌فرم LFT برای میدان‌های R و C توسعه داده می‌شود و سپس نحوه کاربرد مدل‌های توسعه‌یافته جهت آشکارسازی و جابایی عیب، از طریق یک مثال آموزشی توضیح داده می‌شود.

۵- فرم LFT برای نازل آیزنتروپیک

قبل از توسعه فرم LFT برای سیستم تراکم‌پذیر یادآوری می‌گردد، عدم قطعیت روی پارامتر θ را می‌توان به‌صورت $\theta = \theta_n + \Delta\theta$ نشان داد. در صورتی که هدف نمایش عدم قطعیت به‌فرم LFT باشد، بهتر است پارامتر را به‌صورت حاصلضرب پارامتر اسمی در عبارت عدم قطعیت نشان داد. یعنی:

$$\theta = \theta_n + \Delta\theta = \theta_n(1 + \frac{\Delta\theta}{\theta_n}) = \theta_n(1 + \delta_\theta) \quad \text{where} \quad \delta_\theta = \frac{\Delta\theta}{\theta_n} \quad (7)$$

در رابطه بالا $\Delta\theta$ ، به‌ترتیب انحراف مطلق و نسبی پارامتر از مقادیر اسمی پارامتر می‌باشد.

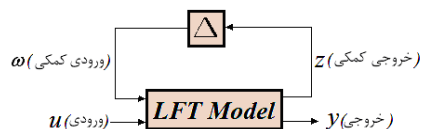
در حالتی که پارامتر به‌صورت $1/\theta$ ظاهر شود، عدم قطعیت به‌فرم LFT را نیز می‌توان به‌شکل زیر نشان داد:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{1}{\theta_n + \Delta\theta} = \frac{\theta_n}{\theta_n(\theta_n + \Delta\theta)} = \frac{(\theta_n + \Delta\theta) - \Delta\theta}{\theta_n(\theta_n + \Delta\theta)} \\ = \frac{1}{\theta_n}(1 - \frac{\Delta\theta}{\theta_n + \Delta\theta}) = \frac{1}{\theta_n}(1 + \delta_{1/\theta}) \quad \text{where} \quad \delta_{1/\theta} = -\frac{\Delta\theta}{\theta_n + \Delta\theta} \quad (8)$$

با این توضیحات، میدان نازل آیزنتروپیک نشان داده شده در شکل ۴- (الف) را در نظر می‌گیریم. جریان جرم $\dot{m}_n$ و جریان انرژی $\dot{E}_n$ که از نازل آیزنتروپیک عبور می‌کند برابر است با [۵]:

$$\begin{cases} \dot{x} = [A_n + \Delta A]x + [B_n + \Delta B]u \\ y = [C_n + \Delta C]x + [D_n + \Delta D]u \end{cases} \quad (5)$$

که در آن x ، u ، y به‌ترتیب حالت، ورودی و خروجی سیستم و A_n ، B_n ، C_n ، D_n ماتریس‌های فضای حالت هستند که درایه‌های آن از مقادیر اسمی پارامترها به‌دست می‌آید. ΔA ، ΔB ، ΔC ، ΔD نیز ماتریس‌های انحراف هستند که به‌علت وجود عدم قطعیت در پارامترهای سیستم بوجود آمده‌اند.



شکل ۳: فرم LFT

دومین مدل با نام مدل داخلی استاندارد^۱ یا مدل حلقه پسخور داخلی^۲ شناخته شده‌است. در این فرم، عدم قطعیت از پارامترهای اسمی مدل جدا شده و اثر عدم قطعیت به‌صورت یک پسخور وارد مدل می‌شود (شکل ۳). معادلات حالت در این فرم به‌صورت زیر خواهند بود.

$$\begin{cases} \dot{x} = A_n x + B_n w + B_{2n} u \\ z = C_n x + D_{11} w + D_{12} u \\ z = C_{2n} x + D_{21} w + D_{22n} u \\ w = \Delta z \end{cases} \quad (6)$$

که در آن $B_{2n} = B_n$ ، $C_{2n} = C_n$ ، $D_{22n} = D_n$ و w و z به‌ترتیب ورودی و خروجی کمکی سیستم و Δ نیز ماتریس قطری است که شامل عدم قطعیت‌های نسبی پارامترها است.

اگر چه به‌دست آوردن معادلات حالت به‌فرم کانونیک و استاندارد از روی باندگراف مدل رفتاری و استفاده آن جهت مطالعه کنترل مقاوم، موضوع تحقیقات اخیر بوده‌است [۱۶، ۱۷]، اما این گزارش روی جنبه‌هایی از باندگراف متمرکز می‌شود که از روی آن بتوان ARRها را بادر نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها استخراج نمود. یعنی فقط فرم LFT مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مدل باندگراف به‌فرم LFT امکان ایجاد خودکار باقیمانده‌ها و آستانه‌های تطبیقی را می‌دهد که آستانه‌های تطبیقی مقاوم بودن روش FDI را به عدم قطعیت‌ها تضمین می‌کند.

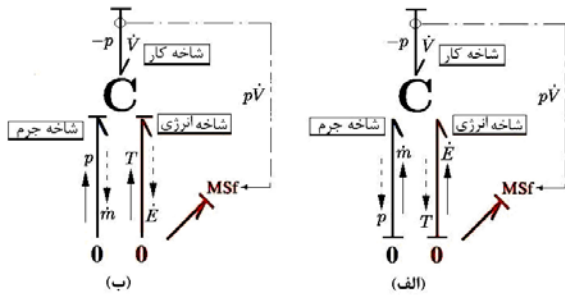
اگر چه باندگراف به‌فرم LFT برای المانهای ذخیره، مقاومتی، انتقال دهنده‌ها و چرخنده‌ها در مرجع [۱۸] آمده‌است اما فرم LFT برای سیالات تراکم‌پذیر توسعه داده نشده‌است. لذا در این مقاله فرم LFT برای نازل آیزنتروپیک و میدان ظرفیتی سیال تراکم‌پذیر توسعه داده شده و در ادامه چگونگی به‌دست آوردن روابط افزونگی تحلیلی و آستانه‌های تطبیقی در قالب یک مثال توضیح داده خواهد شد.

در رابطه بالا $\Delta C_p, \Delta A_e$ عدم قطعیت مطلق و $\delta C_p, \delta A_e$ عدم قطعیت نسبی مربوط به سطح مقطع گلوگاه نازل و ضریب گرمای ویژه فشار ثابت است.

۶- فرم LFT برای میدان C

در میدان ظرفیتی C، در حالت انتگرالی مقادیر $\dot{E}, \dot{m}, \dot{V}$ به‌عنوان ورودی میدان در نظر گرفته می‌شوند و دما و فشار در هر لحظه از رابطه زیر محاسبه می‌شوند (شکل ۵ الف).

$$T = \frac{1}{C_v} \int \dot{E} dt, P = \frac{Z R \int \dot{m} dt}{C_v \int \dot{V} dt} \quad (۱۴)$$



شکل ۵: میدان ظرفیتی (الف) در حالت انتگرالی (ب) در حالت مشتقی DBG

اما در حالتی که از مدل مذکور برای تشخیص عیب استفاده شود، دما و فشاری اندازه‌گیری شده توسط سنسورها، به‌عنوان مقادیر معلوم وارد میدان شده و با فرض ثابت بودن ضریب گرمای ویژه حجم ثابت، مقادیر $\dot{m}, \dot{E}$ در حالت معین از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شوند (شکل ۶ الف).

$$\begin{cases} \dot{m}_n = \frac{d}{dt} \left(\frac{P V_n}{Z_n R T} \right) \\ \dot{E}_n = \frac{d}{dt} \left(\frac{P V_n C_v}{Z_n R} \right) \end{cases} \quad (۱۵)$$

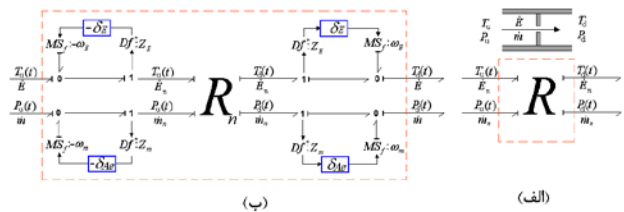
در رابطه بالا Z ضریب تراکم‌پذیری بوده و مقدار و مشتق آن در هر لحظه به‌صورت تابعی از دما و فشار سیال قابل محاسبه است. C_v, V نیز به‌ترتیب حجم و گرمای ویژه گاز در حجم ثابت است. ملاحظه می‌شود در این حالت روابط حاکم بر میدان C به‌صورت مشتقی ظاهر شده‌اند. به باند‌گراف‌هایی که علت آنها به فرم مشتقی باشد، اصطلاحاً باند‌گراف مدل تشخیص DBG^۱ گفته می‌شود (شکل ۵ ب).

بافرض وجود عدم قطعیت روی حجم سیستم (V)، ضریب تراکم‌پذیری (Z) و ضریب گرمای ویژه (C_p)، روابط حاکم بر میدان ظرفیتی C تغییر خواهند کرد. به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، کافی است در رابطه بالا به‌جای مقادیر اسمی V_n, Z_n, C_{pn} به‌ترتیب مقادیر $V = V_n + \Delta V, Z = Z_n + \Delta Z, C_p = C_{pn} + \Delta C_p$ را قرار داد:

$$\begin{cases} \dot{m}_n = C_{dn} \frac{A_n P_u}{\sqrt{R T_u}} \sqrt{\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right) \left(P_r^{\frac{2}{\gamma}} - P_r^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} \\ \dot{E}_n = \dot{m}_n C_{pn} T_u = C_{pn} A_{en} P_u \sqrt{\frac{T_u}{R} \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right) \left(P_r^{\frac{2}{\gamma}} - P_r^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} \end{cases} \quad (۹)$$

در رابطه بالا A_{en} سطح مقطع معادل نازل بوده و برابر حاصلضرب ضریب تخلیه C_{dn} در سطح مقطع اسمی A_n است. همچنین پارامترهای γ, C_p, R, T, P به‌ترتیب نشان‌دهنده فشار، دما، ثابت گاز، ضریب گرمای ویژه فشار ثابت و نسبت گرمای ویژه سیال، و زیرنویس‌های u و d به‌ترتیب به جریان بالادست و پایین‌دست اشاره دارد. P_r نیز نسبت فشار دوطرف نازل است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_r = \begin{cases} P_r = \frac{P_d}{P_u} & \text{if } \frac{P_d}{P_u} > P_{crit} \\ P_r = P_{crit} & \text{if } \frac{P_d}{P_u} < P_{crit} \end{cases} \quad (۱۰)$$



شکل ۶: (الف) نازل آیزن‌روپیک (ب) فرم LFT نازل آیزن‌روپیک

باز در نظر گرفتن عدم قطعیت روی پارامترهای سطح مقطع معادل A_e و ضریب گرمای ویژه C_p ، روابط حاکم بر میدان نازل آیزن‌روپیک، به‌صورت روابط (۱۱) خواهند بود:

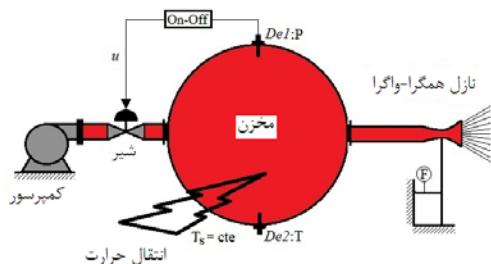
$$\begin{cases} \dot{m} = \frac{(A_{en} + \Delta A_e) P_u}{\sqrt{R T_u}} \sqrt{\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right) \left(P_r^{\frac{2}{\gamma}} - P_r^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} \\ \dot{E} = (C_{pn} + \Delta C_p) (A_{en} + \Delta A_e) P_u \sqrt{\frac{T_u}{R} \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right) \left(P_r^{\frac{2}{\gamma}} - P_r^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} \end{cases} \quad (۱۱)$$

چنانچه بخواهیم روابط بالا را به‌فرم LFT نمایش دهیم، باتوجه به روابط (۷):

$$\begin{cases} \dot{m} = (1 + \delta_{A_e}) \dot{m}_n \\ \dot{E} = (1 + \delta_{C_p}) (1 + \delta_{A_e}) \dot{E}_n \end{cases}, \delta_{A_e} = \frac{\Delta A_e}{A_e}, \delta_{C_p} = \frac{\Delta C_p}{C_p} \quad (۱۲)$$

که در روابط بالا مقادیر $\dot{m}_n, \dot{E}_n$ دبی جرمی اسمی و جریان انرژی ناشی از انتقالی سیال در حالت اسمی است و مقادیر آنها از رابطه (۹) قابل محاسبه است. بنابراین باتوجه به رابطه (۱۲)، فرم LFT نازل آیزن‌روپیک به‌صورت نشان داده‌شده در شکل ۴ ب خواهد بود. در شکل مذکور:

$$\begin{cases} \omega_m = \delta_{A_e} Z_m; Z_m = \dot{m}_n; \\ \omega_E = \delta_{C_p} Z_E; Z_E = \dot{E}_n; \delta_E = \delta_{C_p} + \delta_{A_e} + \delta_{C_p} \\ \delta_{A_e}; \delta_{A_e} = \frac{\Delta A_e}{A_e}; \delta_{C_p} = \frac{\Delta C_p}{C_p} \end{cases} \quad (۱۳)$$



شکل ۷: مخزن هوای فشرده همراه انتقال حرارت

باندگراف تشخیص عیب (DBG) سیستم مذکور به‌فرم LFT، در شکل ۸ نشان داده شده‌است. میدان KE نیز جهت در نظر گرفتن اثرات مومنتوم سیال در نظر گرفته شده که روابط حاکم بر آن در شکل ۸ آمده‌است. با استفاده از مدل مذکور و متناسب با پنج سنسور مورد استفاده در سیستم اصلی، از روی باندهای ۲۹، ۳۸، ۳۵، ۳۲ و ۴۲ پنج باقیمانده به همراه آستانه‌های تطبیقی قابل استخراج خواهد بود. در شکل مذکور مقادیر $\delta_{mR}, \delta_{ER}, \delta_{mC}, \delta_{EC}$ طبق آنچه در بخشهای (۴) و (۵) گفته شد، از روابط محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} \delta_{mR} = \delta_{A^*} \\ \delta_{ER} = \delta_{C_P} + \delta_{A^*} + \delta_{C_P} \cdot \delta_{A^*} \\ \delta_{mC} = \delta_V + \delta_{1/Z} + \delta_V \cdot \delta_{1/Z} \\ \delta_{EC} = \delta_{mC} + \delta_{C_V} + \delta_{mC} \cdot \delta_{C_V} \end{cases} \quad (19)$$

که در آن $\delta_{C_P}, \delta_{C_V}, \delta_V, \delta_{1/Z}, \delta_{A^*}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده عدم قطعیت نسبی روی سطح مقطع گلوگاه نازل، ضریب تراکم‌پذیری سیال، حجم مخزن، ضریب گرمای ویژه در حجم ثابت و ضریب گرمای ویژه در فشار ثابت هستند. در شکل ۸ $\delta_m, \delta_F, \delta_{comp}, \delta_{1/R}, \delta_{Ae}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده عدم قطعیت نسبی روی سطح مقطع خروجی نازل، ضریب مقاومت حرارتی مخزن، دبی کمپرسور و سنسورهای اندازه‌گیری نیرو و دبی جرمی هستند.

برای به‌دست آوردن باقیمانده‌ها از روی باندگراف به‌فرم LFT، اولین باقیمانده از سنسور مجازی Df_1^* به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$ARR_1: f_{35} = f_{34} = f_3 + f_{13} - f_2 - \omega_2 = 0 \quad (20)$$

که در آن:

$$\begin{cases} f_3 = f_4 - \omega_6 = \frac{A_e P}{\sqrt{RT}} \sqrt{\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right) \left(\frac{P_r^\gamma}{P_r^\gamma} - P_r^\gamma \right)} (1 + \delta_{mR}) \\ f_{13} = \frac{d}{dt} \left(\frac{PV_{reservoir}}{ZRT} \right) \\ f_2 = f_1 = f_{43} + \omega_{10} = (1 + \delta_{comp}) \cdot \Phi_{compressor}(u) \\ \omega_2 = -\delta_{mC} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{PV_{reservoir}}{ZRT} \right) \end{cases} \quad (21)$$

با جایگذاری رابطه (۲۱) در (۲۰):

$$\begin{cases} \dot{m} = \frac{d}{dt} \left(\frac{P(V_n + \Delta V)}{(Z_n + \Delta Z)RT} \right) \\ \dot{E} = \frac{d}{dt} \left(\frac{P(V_n + \Delta V)(C_{Vn} + \Delta C_V)}{(Z_n + \Delta Z)R} \right) \end{cases} \quad (16)$$

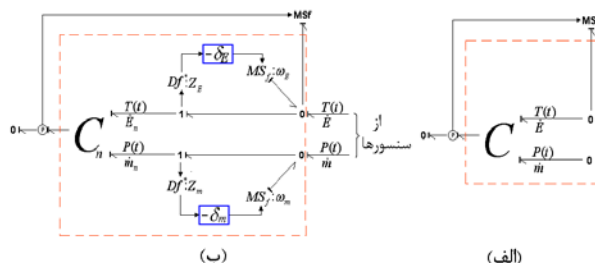
چنانچه روابط فوق به‌فرم LFT نمایش داده‌شود، باتوجه به روابط (۷) و (۸)، معادلات حاکم بر میدان ظرفیتی C در حالت مشتقی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{m} = (1 + \delta_V)(1 + \delta_{1/Z})\dot{m}_n \\ \dot{E} = (1 + \delta_V)(1 + \delta_{1/Z})(1 + \delta_{C_V})\dot{E}_n \end{cases} \quad (17)$$

در روابط بالا، مقادیر $\dot{m}_n, \dot{E}_n$ دبی جرمی اسمی و جریان انرژی ناشی از انتالپی سیال در حالت اسمی هستند که مقادیر آنها از رابطه (۱۵) قابل محاسبه‌است. بنابراین باتوجه به رابطه (۱۷)، فرم LFT برای میدان ظرفیتی C به‌صورت نشان داده‌شده در شکل ۶ (ب) خواهد بود.

$$\begin{cases} \omega_m = \delta_m \cdot Z_m; \quad Z_m = \dot{m}_n; \quad \delta_m = \delta_V + \delta_{1/Z} + \delta_V \cdot \delta_{1/Z} \\ \omega_E = \delta_E \cdot Z_E; \quad Z_E = \dot{E}_n; \quad \delta_E = \delta_m + \delta_{C_V} + \delta_m \cdot \delta_{C_V} \end{cases} \quad (18)$$

در روابط بالا $\Delta V, \Delta Z, \Delta C_V$ به‌ترتیب عدم قطعیت مطلق و عدم قطعیت‌های نسبی مربوط به ضریب گرمای ویژه و حجم ثابت، ضریب تراکم‌پذیری و حجم مخزن است.



شکل ۶: (الف) مدل معین میدان C (ب) مدل نامعین میدان C به‌فرم LFT

۷- مثال آموزشی

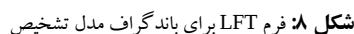
سیستم هوای فشرده نشان‌دهنده در شکل ۷ را در نظر بگیرید. سیستم مذکور شامل کمپرسور، شیر قطع و وصل، مخزن، نازل همگرا-واگرا و تعدادی سنسور است. در سیستم مذکور یک کمپرسور با دبی جرمی ثابت، فشار هوای مخزن را توسط یک شیر روشن-خاموش در محدوده ± 25 بار نگه می‌دارد. هوای متراکم ذخیره شده در مخزن، از طریق یک نازل همگرا-واگرا به محیط بیرون تخلیه می‌شود. انتقال حرارت نیز از طریق دیواره‌های مخزن با محیط اطراف نیز در نظر گرفته شده‌است.

فشار مخزن (P)، دمای مخزن (T)، دبی عبوری از کمپرسور ($\dot{m}$)، نیروی تراستر (F) و سیگنال کنترلی (u) توسط پنج سنسور اندازه‌گیری می‌شود.

$$\Rightarrow ARR_1 : a_1 = |\omega_6| + |\omega_2| + |\omega_{10}| \quad (22)$$

$$ARR_2: f_{38} = f_{37} = f_9 + f_{16} - \omega_3 + f_{14} - f_8 = 0 \quad (23)$$

که با جایگذاری مقادیر مربوطه، باقیمانده دوم به همراه آستانه‌های تطبیقی، به صورت زیر به دست خواهد آمد:



علاوه بر این ملاحظه می‌شود، ماتریس تفکیک خطای به‌دست آمده یک ماتریس هیبریدی است. یعنی آشکارسازی و تفکیک خطا در کمپرسور به سیگنال کنترلی u بستگی دارد. به عبارت دیگر وقتی $u=1$ باشد، خطا در کمپرسور قابل آشکارسازی و قابل تفکیک است و در حالتی که $u=0$ باشد، خطا در کمپرسور غیرقابل آشکار شدن است.

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار 20Sim انجام شده‌است. برای انجام شبیه‌سازی از مقادیر نشان داده‌شده در جدول ۳ استفاده شده‌است.

جدول ۲: ماتریس علامت عیبی تئوری

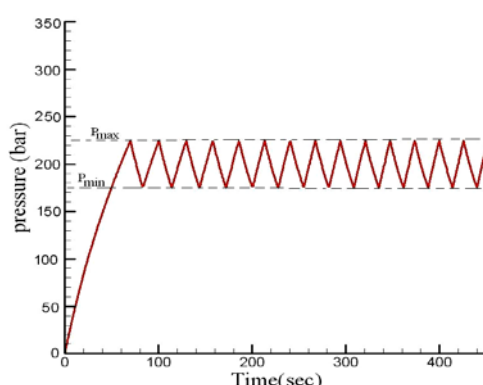
	r_1	r_2	r	r	r	M_b	I_b
مخزن	1	1	0	0	0	1	1
نازل	1	1	0	0	1	1	1
کمپرسور	u	u	u	0	0	u	u
سوئچ	0	0	0	1	0	1	1
لودسل	0	0	0	0	1	1	1
فلومتر	0	0	1	0	0	1	1
عایق	0	1	0	0	0	1	1

جدول ۳: پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی

واحد	مقدار	نماد	پارامتر
Kg/sec	۰/۲۵	Q_{max}	دبی کمپرسور
m^3	۰/۰۶	V	حجم مخزن
mm^2	۲/۱۳	A^*	سطح مقطع گلوگاه نازل
--	۱/۳	A_e/A^*	نسبت مقطع خروجی به گلوگاه
Bar	200 ± 25	$P \pm \Delta P$	فشار تنظیم شیر روشن-خاموش
K/w	۰/۰۲	R	ضرب مقاومت حرارتی مخزن

پاسخ مدل رفتاری سیستم در شکل ۹ نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود شیر کنترلی روشن-خاموش فشار مخزن را محدوده 200 ± 25 بار نگه می‌دارد.

برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده، ابتدا نشان داده می‌شود در حالت کارکرد عادی، باقیمانده‌ها در محدوده مجاز قرار دارند. سپس چند عیب به سیستم معرفی می‌شود و نشان داده می‌شود که مدل مذکور قابلیت شناسایی عیوب را دارد.



شکل ۹: تغییرات فشار مخزن

برای به‌دست آوردن باقیمانده چهارم که مربوط به سنسور اندازه‌گیری سیگنال کنترلی Ds است، نیز به صورت زیر عمل می‌شود:

$$ARR_4 = s_{42} = s_{40} - s_{41} \quad (26)$$

$$ARR_4 : \begin{cases} r_4 = \Phi_{On-Off}(p) - u(t) \\ a_4 = 0 \end{cases}$$

و بالاخره پنجمین باقیمانده نیز باتوجه به باند ۲۹ به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$ARR_5 : e_{29} = e_{28} - e_{30} - \omega_8 = e_{26} + e_{25} + \omega_7 - e_{30} - \omega_8 \quad (27)$$

که با جایگذاری مقادیر مربوطه، باقیمانده پنجم به همراه آستانه‌های تطبیقی به صورت روابط (۲۸) به دست خواهد آمد:

$$\begin{cases} r_5 = \frac{A_e P}{\sqrt{RT}} \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma-1} \right) \left(\frac{P_r^\gamma}{P_r^\gamma} - P_r^\gamma \right)} \sqrt{\gamma RT_3 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2 \right)^{-1}} M_e \\ + \left(P \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2 \left(A_e/A^* \right)^{\frac{-\gamma}{\gamma-1}} - P_{atm} \right) A_e - F \right. \\ a_5 = |\omega_6| v_e + |\omega_7| + |\omega_8| \\ \left. = \left| \delta_{mR} \frac{A_e P}{\sqrt{RT}} \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma-1} \right) \left(\frac{P_r^\gamma}{P_r^\gamma} - P_r^\gamma \right)} \right| \right. \\ \times \left| \sqrt{\gamma RT_3 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2 \right)^{-1}} M_e^2 \right| \\ \left. + \left| \delta_{Ae} \left(P \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2 \right)^{\frac{-\gamma}{\gamma-1}} - P_{atm} \right) A_e \right| + |\delta_F \cdot F| \right\} \quad (28)$$

که در آن Φ_{On-Off} ، $\Phi_{compressor}$ به ترتیب توابع مشخصه کمپرسور و سوئچ کنترلی روشن-خاموش با حلقه هیستریزس هستند و به صورت روابط (۲۹) تعریف می‌شوند:

$$\Phi_{compressor}(u) = \begin{cases} Q_{max} & \text{if } u = 1 \\ 0 & \text{if } u = 0 \end{cases} \quad (29)$$

$$\Phi_{On-Off}(p) = \begin{cases} u = 0 & \text{if } p > p_{max} \\ u = 1 & \text{if } p < p_{min} \\ \text{previous state} & \text{if } p_{min} < p < p_{max} \end{cases}$$

بنابراین باتوجه به روابط (۲۲)، (۲۴)، (۲۵)، (۲۶) و (۲۸) خواهیم-

داشت:

$$\begin{cases} ARR_1 : f(Compressor, Re servior, Nozzle, De_1, De_2) \\ ARR_2 : f(Compressor, Re servior, Nozzle, De_1, De_2, \\ Insolation) \\ ARR_3 : f(Compressor, Df) \\ ARR_4 : f(\Phi_{On-Off}, Ds) \\ ARR_5 : f(Nozzle, De_1, De_2, De_3) \end{cases} \quad (30)$$

با توجه به آنچه در بخش ۲ گفته شد، ماتریس علامت خطای تئوری، به صورت نشان داده شده در جدول ۲ به دست خواهد آمد. در تشکیل ماتریس تفکیک خطای تئوری، فرض شده سنسورهای اندازه‌گیری دما (De_1)، فشار (De_2) و سیگنال u (Ds) بدون عیب باشند. بنابراین پارامترهای مربوط به این المان‌ها از ماتریس علامت عیب حذف شده‌اند.

۸- اعتبارسنجی

شکل های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب باقیمانده ها و آستانه های تطبیقی را برای حالت کارکرد عادی سیستم نشان می دهند. برای محاسبه آستانه ها، عدم قطعیت مربوط به عایقکاری مخزن ($\delta_{Y/R}$) برابر ۰/۰۵ و سایر عدم قطعیت ها برابر ۰/۰۲ فرض شده اند. ملاحظه می شود کلیه باقیمانده ها در محدوده مجاز قرار دارند. بنابراین در این حالت بردار خطایی شکل نمی گیرد. ($\vec{C} = (0,0,0,0,0)$)

۸-۱- خطای انسداد جزئی در نازل

برای معرفی عیب در نازل، در فاصله زمانی ۲۰۰-۱۰۰ ثانیه، با کاهش سطح مقطع نازل انسداد جزئی به نازل اعمال می شود. نتایج حاصل از شبیه سازی برای حالتی که انسداد ۳۰ درصدی در نازل اتفاق افتاده باشد، در شکل ۱۲ ترسیم شده است. ملاحظه می شود، در این حالت فقط باقیمانده های اول، دوم و پنجم از آستانه های خود تجاوز نموده اند. بنابراین بردار خطا به صورت $\vec{C} = (1,1,0,0,1)$ ظاهر خواهد شد که این بردار خطا در جدول ۲، نشان دهنده وجود عیب در نازل است.

۸-۲- خطای سنسور اندازه گیری نیرو

در حالت بعد، در فاصله زمانی ۲۰۰-۱۰۰ ثانیه، خطای ۱۰ درصدی به سنسور اندازه گیری نیرو اعمال می شود. نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل ۱۳ ترسیم شده است. ملاحظه می شود بردار خطا به صورت $\vec{C} = (0,0,0,0,1)$ ظاهر خواهد شد که این بردار خطا در جدول ۲، نشان دهنده وجود عیب در سنسور اندازه گیری است.

۸-۳- خطای عایق حرارتی مخزن

در این قسمت فرض شده است در فاصله زمانی ۲۰۰-۱۰۰ ثانیه، قسمتی از عایق حرارتی مخزن برداشته شده، به طوری که ضریب مقاومت حرارتی از اندازه اسمی خود خارج و از عدد اسمی $0.02 K/w$ به $0.01 K/w$ کاهش یابد. نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل ۱۴ ترسیم شده است. ملاحظه می شود، اگرچه باقیمانده دوم مقدار غیر صفری به خود اختصاص داده و در حالت معین (بدون وجود عدم قطعیت ها) باعث ایجاد بردار خطا به صورت $\vec{C} = (0,1,0,0,0)$ شده و این نشان دهنده وجود عیب در عایق حرارتی است (جدول ۲)، اما همان طور که در شکل ملاحظه می شود، در حالتی که عدم قطعیت ها نیز در نظر گرفته شود، به دلیل اینکه باقیمانده دوم از مقدار آستانه مربوطه اش تجاوز نکرده است، بردار خطایی شکل نمی گیرد ($\vec{C} = (0,0,0,0,0)$). یعنی عیب قابلیت آشکار شدن ندارد. بنابراین لازم است ماتریس علامت عیب تئوری اطلاع شود.

در کاربرهای عملی، تشخیص بین ماتریس علامت عیب تئوری^۱ و عملی^۲ اهمیت خیلی زیادی دارد. ماتریس خطای تئوری از آنالیز

ساختاری و طبق رابطه (۳) به دست می آید، درحالی که ماتریس خطای عملی که در تست های با زمان واقعی^۳ مورد استفاده قرار می گیرد، بر مبنای آنالیز حساسیت باقیمانده ها تشکیل می شود. به عبارت دیگر اگرچه ممکن است یک ARR به چندین عیب حساس باشد، اما درجه این حساسیت ها ممکن است آنقدر متفاوت باشد که در رابطه ARRها بتوان از آن چشم پوشی نمود. اینجا است که بحث آنالیز حساسیت موضوعیت پیدا می کند. یعنی لازم است ماتریس تفکیک خطایی که از راه تئوری به دست آمده است، با آنالیز حساسیت باقیمانده ها، به ماتریس تفکیک خطای عملی اصلاح شود.

در قسمت بعدی چگونگی آنالیز حساسیت و استفاده از آن جهت اصلاح ماتریس خطای تئوری به خطای ماتریس عملی توضیح داده خواهد شد.

۹- آنالیز حساسیت

ملاحظه شد ARRها در حالت معین، از دو قسمت تشکیل شده بودند. قسمت معین (r_n) برای محاسبه مقدار عددی باقیمانده ها و قسمت نامعین یا عدم قطعیت (a) برای محاسبه آستانه های تطبیقی مورد استفاده قرار می گرفتند:

$$ARR_i = r_i + a_i \quad (31)$$

اما در کاربردهای عملی، برای آنالیز حساسیت، نیاز به شاخصی داریم که حساسیت باقیمانده ها به عدم قطعیت ها را به صورت نسبی بیان کند. به این منظور شاخص حساسیت^۴ به صورت نسبت سعی (پیشروی) اعمال شده به مدل توسط عدم قطعیت δ_i ، به کل سعی (پیشروی) اعمال شده توسط همه عدم قطعیت های ظاهر شده در قسمت نامعین (a)، تعریف می شود:

$$SI_{\delta_i} = \frac{|\omega_i|}{a} \quad (32)$$

بدیهی است که در یک ARR، جمع جبری شاخص های حساسیت برابر یک خواهد شد.

$$\sum SI_{\delta_i} = \sum \frac{|\omega_i|}{a} = \frac{\sum |\omega_i|}{a} = 1 \quad (33)$$

به عنوان مثال آستانه مربوط به باقیمانده دوم طبق رابطه (۲۴) به صورت زیر است:

$$a_2 = |\omega_5| + |\omega_4| + |\omega_3| + |\omega_1| \quad (34)$$

3 Real time
4. Sensitivity index

1. Theoretical fault signature matrix
2. Practicall fault signature matrix

- [4] H. M. Paynter, *Analysis and Design of Engineering Systems*, M.I.T. Press, 1961.
- [5] D. C. Karnopp, D.L. Margolis, and R.C. Rosenberg, *System Dynamics Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*, 4th edition, John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [6] G. Dauphin-Tanguy, A. Rahmani, & C. Sueur, Bond graph aided design of controlled systems. *Simulation Practice and Theory*, Vol. 7, pp.493–513, 1999.
- [7] P. J. Feenstra, P. J. Mosterman, G. Biswas, and P.C. Breedveld, Bond graph modeling procedures for fault detection and isolation of complex flow processes, in: *Proc. ICBGM'01, Simulation series*, Vol. 33, No.1, pp.77-82., 2001.
- [8] T. Kohda, K. Inoue, and H. Asama, Computer aided failure analysis using system bon graphs, in: *Proc. ICBGM'01, Simulation series*, Vol. 33, No.1, , pp.71-76, 2001.
- [9] M. A. Djeziri, B. Ould Bouamama, G. Dauphin-Tanguy, Robust fault diagnosis by using bond graph approach. *ASME Transactions on mechatronics*, Vol. 12, No. 6, pp. 599-611, 2007.
- [10] M. A. Djeziri, B. Ould Bouamama, R. Merzoudki, Modeling and robust FDI of steam generator using uncertain bond graph model. *Journal of Process Control*, Vol.19, pp.149-162. 2007.
- [11] A. K. Samantaray, and G. Dauphin-Tanguy, *Manual of System Modeling by Bond graph Language Simulation: SYMBOLS Ver 1.0*, IIT Kharagpur, 1997.
- [12] J. F. Broenink. *20-sim software for hierarchical bond-graph/block-diagram models*, Accessed 1999; <http://www.20sim.com>.
- [13] R. Jacob-Macoy, *Lorenz Simulation*. Accessed 2007; <http://www.lorsim.be/Default.htm>.
- [14] A. Samantaray, B. Ould Bouamama, *Model-based Process Supervision . A Bond Graph Approach. Advances in Industrial Control*. Springer, London. 2008.
- [15] A. Mukherjee, R. Karmakar, A. K. Samantaray, *Bond Graph in Modeling, Simulation and Fault Identification*, I.K. International Publishing House Pvt. Ltd, 2006.
- [16] W. Borutzky and G. Dauphin-Tanguy. Incremental Bond Graph Approach to the Derivation of State Equations for Robustness Study. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 12, No. 1, pp.41-60, 2004.
- [17] C. Sié Kam, G. Dauphin-Tanguy, Bond graph models of structured parameter uncer-tainties, *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 342, pp. 379–399, 2005.
- [18] W. Borutzky, *Bond Graph Modelling of Engineering Sytem*, Springer New Yourk Dordrecht Heidelberg London, 2011

با تقسیم دو طرف رابطه فوق بر مقدار کل آستانه a_2 ، شاخص حساسیت یا به عبارت دیگر، سهم هریک از عدم قطعیت‌ها در به وجود آمدن آستانه مشخص می‌گردد. یعنی:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{|w_5|}{a_2} + \frac{|w_4|}{a_2} + \frac{|w_3|}{a_2} + \frac{|w_1|}{a_2} = 1 \\ SI_{\delta_{comp,Cp}} + SI_{\delta_{EC}} + SI_{\delta_{1/R}} + SI_{\delta_{ER}} + SI_{\delta_{mR}} = 1 \end{array} \right. \quad (35)$$

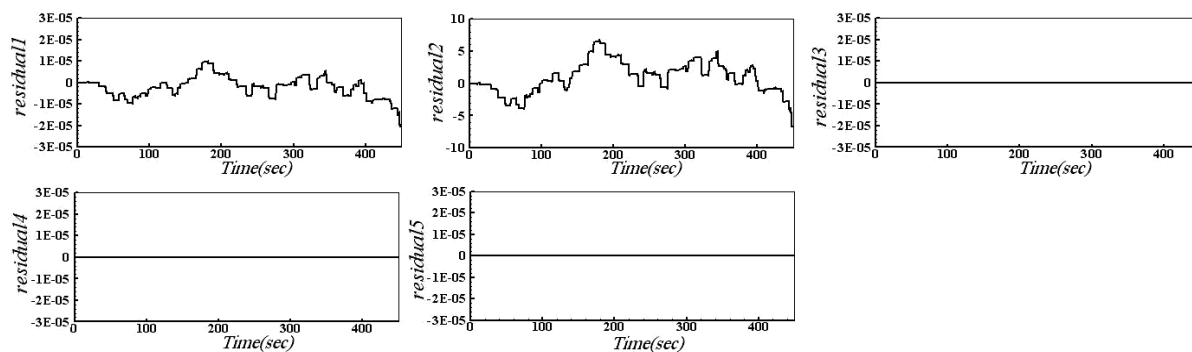
شاخص حساسیت هریک از باقیمانده‌ها در شکل ۱۵ رسم شده‌است. کوچکتر بودن شاخص حساسیت در هر باقیمانده، به معنای کم بودن سهم عدم قطعیت در بوجود آمدن آستانه‌ها است، که این خود به معنای کم بودن سهم تغییرات پارامتر در مقدار عددی باقیمانده است. نکته قابل توجه در شکل ۱۵ دارا بودن مدهای مختلف کاری سیستم است. به سیستم‌هایی که دارای مدهای مختلف کاری می‌باشند، سیستم‌های هیبریدی^۱ می‌گویند که روش باندگراف قابلیت مدل کردن این سیستم‌ها را دارد و همان‌طور که در قسمت تشکیل ماتریس علامت عیب به آن اشاره شد، جدول علامت عیب این سیستم‌ها نیز تابعی از مدهای کاری سیستم است.

۱۰- نتیجه گیری

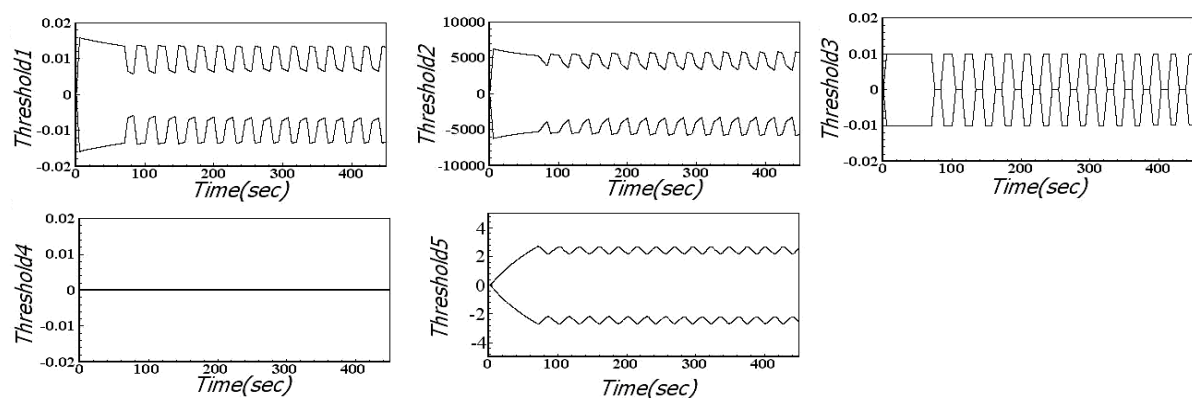
در این مقاله برای در نظر گرفتن عدم قطعیت، فرم LFT برای سیستم‌های تراکم‌پذیر به‌روش باندگراف توسعه داده شد. همچنین در قالب یک مثال نشان داده شد، خواص علی باندگراف می‌تواند روابط افزونگی تحلیلی را بر حسب متغیرهای معلوم به دست آورد. علاوه بر آن فرم LFT نیز قادر به محاسبه آستانه‌های تطبیقی می‌باشد، به طوری که قسمت معین روابط افزونگی تحلیلی برای به دست آوردن باقیمانده‌ها و قسمت نامعین روابط افزونگی تحلیلی برای به دست آوردن آستانه‌های تطبیقی مورد استفاده قرار گرفت. توانمندی مدل‌های ارائه شده در خصوص آنالیز حساسیت نیز نشان داده شد. بنابراین از مدل مذکور می‌توان جهت طراحی سیستم FDI مقاوم به عدم قطعیت در سیستم‌های تراکم‌پذیر استفاده نمود.

مراجع

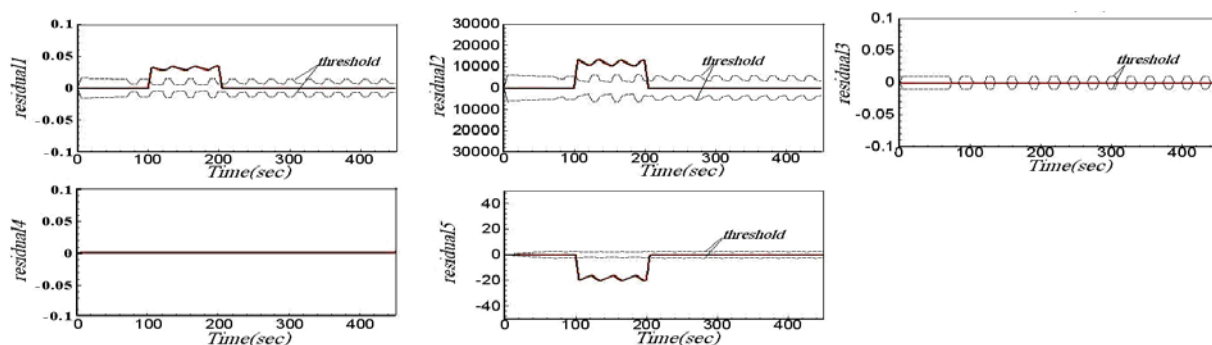
- [1] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin & S. N. A. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis. Part II: Qualitative models and search strategies. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 313–326, 2003.
- [2] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin & S. N. A. Kavuri. A review of fault detection and diagnosis. Part III: Process history based methods. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 327–346, 2003.
- [3] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin & S. N. A. Kavuri, review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp.293–311, 2003.



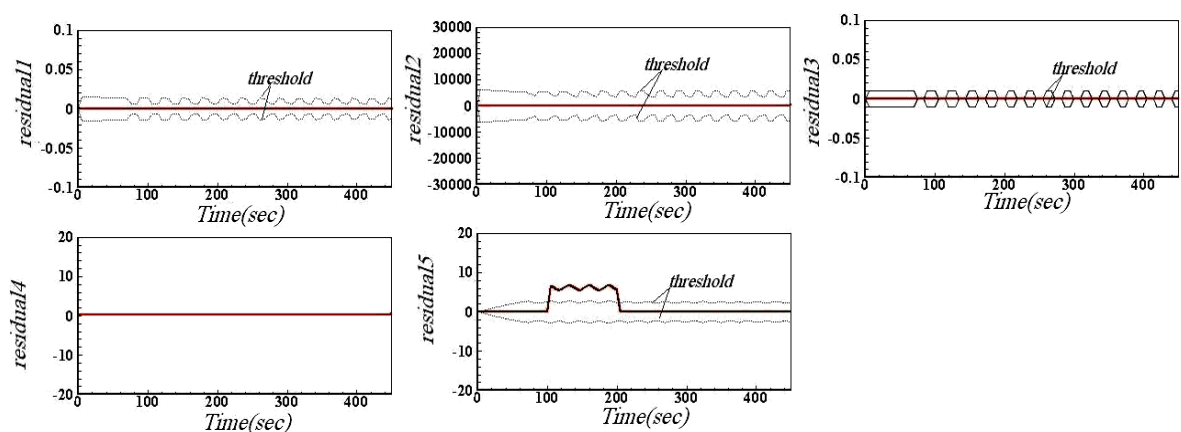
شکل ۱۰: باقیمانده‌ها در حالت کارکرد عادی



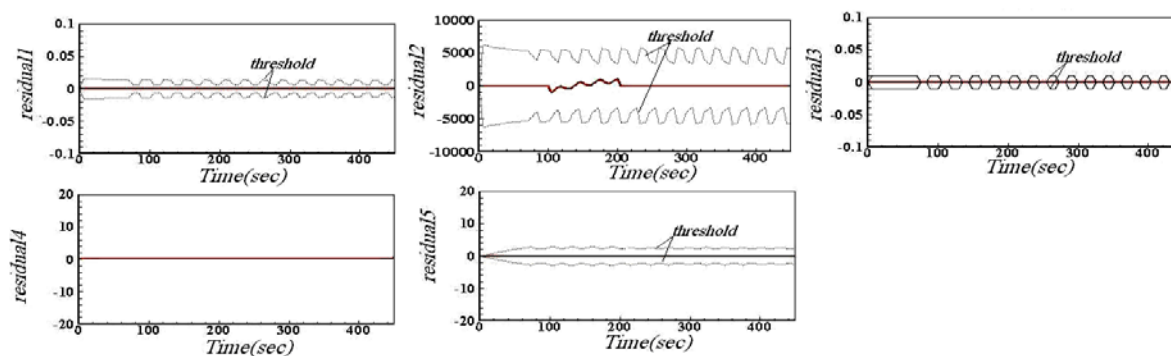
شکل ۱۱: آستانه‌های تطبیقی در حالت کارکرد عادی



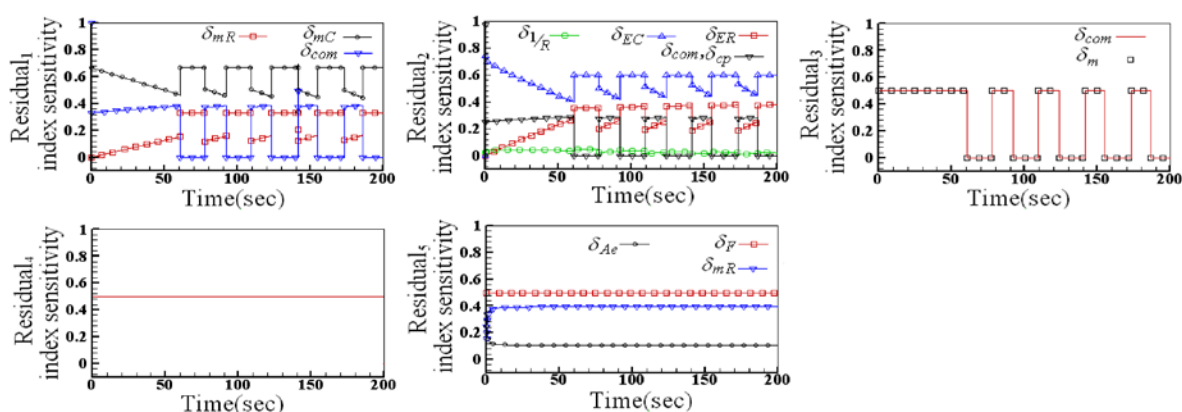
شکل ۱۲: باقیمانده‌ها به همراه آستانه‌های تطبیقی در حالت انسداد جزئی نازل (۳۰٪ انسداد)



شکل ۱۳: باقیمانده‌ها به همراه آستانه‌های مربوطه در حالتی که خطای ۱۰٪ در سنسور اندازه‌گیری نیرو بوجود آمده باشد



شکل ۱۴: باقیمانده به‌همراه آستانه‌های مربوطه برای حالتی که ۵۰٪ عایق حرارتی مخزن برداشته شده باشد.



شکل ۱۵: آنالیز حساسیت باقیمانده‌ها