

Design of Fault Tolerant System Using Model Predictive Control and Model-Based Fault Identification for a Chemical Reactor**Mehrdad Raeiisi^{1,2}, M.Sc., Seyed Mohamad Kargar^{1,2}, Assistant Professor**¹Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran²Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
mehrdad.raeiisi@gmail.com, kargar@pel.iaun.ac.ir**Abstract**

Due to the possibility of fault in any industrial system's actuators, using a fault-tolerant control structure to compensate for the fault and maintain the system stability seems necessary. In this paper, the Continuously Stirred Tank Reactor model is evaluated, which has a nonlinear model with temperature outputs and heating inlets of interconnected tanks. An Unscented Kalman filter is used to estimate the model's output dynamics, which has a suitable convergence speed and higher accuracy than other estimators. The nonlinear predictive control approach is used to apply the appropriate heating rate to the system to achieve the desired temperatures for each tank when there is no fault in the system. In the proposed design, to compensate for the fault, a sliding mode observer has been used to identify the fault. When a fault is detected, a fuzzy proportional derivative controller is used to control the system's fault. MATLAB software has been used to evaluate the proposed method in different working modes of the reactor model. The simulation results show the good performance of the proposed method to compensate for the fault.

Keywords: chemical continuously stirred tank reactor, unscented Kalman filter, model predictive control, fault-tolerant control.

Received: 11 October 2020

Revised: 2 November 2020

Accepted: 8 February 2021

Corresponding Author: Dr. Seyed Mohamad Kargar

طراحی سیستم تحمل‌پذیر عیب با استفاده از روش کنترل پیش‌بین و شناسایی عیب مبتنی بر مدل برای یک راکتور شیمیایی

مهرداد ریسی^۱، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، سید محمد کارگر^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

mehrdad.raeisi@gmail.com, kargar@pel.iaun.ac.ir

چکیده: با توجه به امکان وقوع عیب در عملگرهای هر سیستم صنعتی، نیاز به شناسایی و استفاده از یک ساختار کنترلی کمکی در راستای جبران عیب و حفظ سطح پایداری سیستم، استفاده از ساختار کنترلی تحمل‌پذیر عیب در صنعت یک مسئله‌ی ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله مدل راکتور همزن شیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفته که دارای مدل غیرخطی با خروجی‌های دما و ورودی گرمایش تانک‌های به هم پیوسته است. به‌منظور تخمین دینامیک‌های خروجی مدل از فیلتر کالمن خنثی استفاده می‌شود که به نسبت سایر تخمین‌گرها سرعت همگرایی مناسب و دقت بالاتری دارد. به منظور طراحی کنترل‌کننده از رویکرد کنترل پیش‌بین غیرخطی استفاده شده که در لحظاتی که عیب در سیستم وجود ندارد، میزان گرمایش مناسب برای دستیابی به دماهای مطلوب برای هر تانک را به سیستم اعمال می‌کند و نهایتاً منجر به پایداری سیستم می‌گردد. در طرح پیشنهادی به منظور جبران عیب، از رویکرد مدله‌گزشی به منظور شناسایی عیب استفاده شده است. زمانی که عیب تشخیص داده شد، از یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر فازی به‌منظور کنترل خروجی با وجود عیب در سیستم استفاده می‌شود. شبیه‌سازی روش پیشنهادی در نرم‌افزار متلب و در حالت‌های کاری مختلف انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده عملکرد مطلوب روش پیشنهادی در جهت جبران عیب است.

کلمات کلیدی: راکتور همزن شیمیایی، فیلتر کالمن خنثی، کنترل پیش‌بین، کنترل تحمل‌پذیر عیب

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۷/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۸/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سیدمحمد کارگر

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

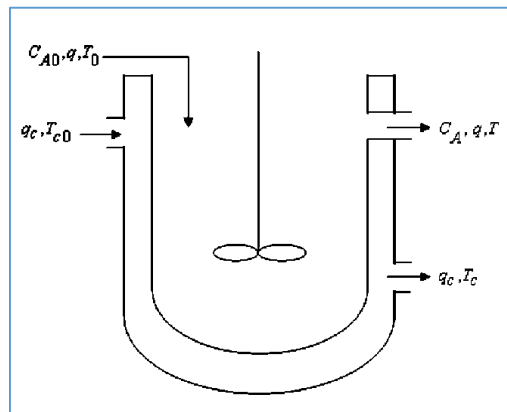
۱- مقدمه

عدم تشخیص به موقع عیب یا خرابی در سیستم‌ها، بخصوص سیستم‌های حساس شیمیایی از جمله مشکلات بزرگ و متعددی است که صنعت پتروشیمی در سراسر دنیا از آن رنج می‌برند. وقوع این عیب‌ها معمولاً باعث از بین رفتن مقادیر قابل توجهی از مواد اولیه و اطلاعات می‌شود. از جمله مشکلات دیگری که عیب در عملگرهای شیمیایی باعث آن می‌گردد، می‌توان به از کاهش تولید، آسیب در بخش‌های مختلف فرآیند و حتی در برخی از موارد باعث تلفات جانی نیز می‌شود. لازم به ذکر است که تنها استفاده از اپراتورهای انسانی برای مراقبت و مدیریت بسیاری از سیستم‌های شیمیایی به دلیل حساسیت و شرایط ویژه آن‌ها امکان‌پذیر نیست، از جمله این دلایل می‌توان فرسودگی اجزاء سیستم پیش‌بینی پارامترها، اغتشاشات موجود و ... اشاره کرد. کنترل‌کننده پیش‌بین خطی و غیرخطی دو کنترل‌کننده پرکاربرد هستند که به‌طور گسترده در صنعت فرآورده‌های شیمیایی در دودخانه اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این وجود، کنترل سیستم غیرخطی با استفاده از طرح‌های کنترلی خطی گفته شده در همه مدل‌های عملیاتی رضایت‌بخش نیستند، زیرا پارامترهای فرآیند در فرآیندهای غیرخطی با توجه به شرایط عملیاتی تغییر می‌کنند. در طرح‌های کنترلی مبتنی بر مدل، دقت مدل تأثیر مهمی بر عملکرد حلقه بسته سیستم کنترلی دارد. طیف گسترده‌ای از طرح‌های کنترلی تطبیقی چند مدله در این ادبیات کنترلی ارائه شده‌اند [۱-۷]. گائو و همکاران [۱]، یک کنترل‌کننده غیرخطی انتگرال‌گیر، مشتق‌گیر و تناسبی با استفاده از شبکه‌های مدل محلی برای راکتور شیمیایی همزن‌دار^۱ به‌منظور کنترل دمای مخازن ارائه کرده‌اند که در آن اثرات مرتبط با وقوع عیب مورد بررسی قرار نگرفته است و صرفاً ساختار کنترلی به‌منظور دستیابی به پایداری مورد بررسی قرار گرفته است. عمر گالان و همکاران [۲] اجرای زمان واقعی روش‌های کنترلی مبتنی بر مدل چندگانه خطی در فرآیندهای اندازه‌گیری آزمایشگاهی را ارائه کردند که بخش‌های غیرخطی مدل حذف شده است. یک روش ساده برای توصیف سیستم خطی دینامیکی با استفاده از مدل‌های خطی چندگانه توسط تاکاگی-سوگو [۳] ارائه شده است که در آن به‌منظور بهبود کنترل‌کننده غیرخطی انتگرال‌گیر، مشتق‌گیر و تناسبی^۲ و کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و با توجه به اهمیت موضوع بررسی عیب در این فرآیند، چالش کنترل عیب وجود دارد. در هر لحظه نمونه‌گیری، کنترل‌کننده رؤیتگر، وزن‌ها را برای هر کنترل‌کننده مشخص می‌کند و سپس به عنوان ورودی به مدل اعمال می‌شوند. آنالیزهای پایداری یک الگوریتم کنترلی پیش‌بین چند مدله برای کنترل راکتورهای شیمیایی توسط اوزکان و کوتار ارائه شده است [۴]. واحد کلیدی عملیات در کارخانه‌های شیمیایی یعنی واحد راکتور با مخزن همزن پیوسته، رفتار دینامیکی غیرخطی زیادی را نشان می‌دهد. بسیاری از طرح‌های کنترلی پیشرفته مانند کنترل‌کننده تطبیقی عصبی [۵]، طرح کنترلی غیرخطی داخلی [۶] و طرح کنترلی پیش‌بین [۷] در فرآیندهای راکتور شیمیایی همزن‌دار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در مرجع [۷] ارائه یک الگوریتم کنترل پیش‌بین مبتنی به مدل‌های خطی چندبعدی برای راکتور شیمیایی همزن‌دار استفاده می‌کند. رویکرد کنترل شامل هزینه افق محدود و هزینه افق نامحدود است. هزینه افق محدود از خروجی‌های کنترل آینده تشکیل شده است که سیستم را مجبور می‌کند تا نقطه کار مورد نظر را جابجا کند. هزینه افق نامحدود دارای حد بالایی است و سیستم را به نقطه کار حالت پایدار می‌برد. برای سیستم راکتور شیمیایی همزن‌دار، چندین روش کنترل تحمل‌پذیر عیب در قالب تحقیقات گسترده‌ای ارائه شده است. در مرجع [۸]، یک کنترل‌کننده عیب برای یک سیستم راکتور شیمیایی همزن‌دار که در معرض محدودیت و عیب‌های موجود در سنسور اندازه‌گیری داده است، از طریق یک رویکرد مبتنی بر رؤیتگر خروجی، که می‌تواند پایداری حلقه بسته را حفظ کند، طراحی شده است. در مرجع [۹]، یک سیستم راکتور شیمیایی همزن‌دار به شکل شبکه عصبی تطبیقی مدل می‌شود. هنگام بروز عیب، با استفاده از یک کنترل‌کننده انتگرال‌گیر، مشتق‌گیر و تناسبی تنظیم خودکار بر اساس مدل تعیین شده، اثرات عیب را جبران می‌کند، اما ساختار تشخیص عیب آن ضعیف بوده و بر مبنای محاسبه خطای یک مقدار حد آستانه، عیب کنترل می‌گردد. در مرجع [۱۰]، روشی را برای طراحی کنترل‌کننده بر اساس یادگیری تطبیقی و یک عملکرد سوئیچ‌زنی ارائه می‌دهد و سپس این روش را با استفاده از مدل ایده‌آل سیستم راکتور شیمیایی همزن‌دار، طراحی شده که با فرض در دسترس بودن دینامیک‌های مدل، کنترل‌کننده طراحی شده و نیاز به ساختار تخمین‌گر دینامیک‌های خروجی مدل محسوس است. در مرجع [۱۱] روشی دیگر برای طراحی کنترل تحمل‌پذیر عیب همزمان با تشخیص به روش پربیتی ارائه شده است. در مرجع [۱۲]، یک روش برای تحمل عیب برای کنترل یک سیستم راکتور شیمیایی همزن‌دار با وجود عیب بر روی

عملگرهای ارائه شده است. در این روش با تکیه بر هماهنگی کنترل‌کننده تناسبی و یک کنترل‌کننده پایدارساز غیرمستقیم، امکان جبران عیب را فراهم می‌کند. بر اساس این روش محدودیت در ورودی کنترلی در نظر گرفته نشده و این موضوع می‌تواند چالشی برای کنترل با بهره‌های بالا برای مدل باشد. با توجه به مقاومت ذاتی الگوریتم‌های مدل‌گزشی به عدم قطعیت مدل‌ها و اختلالات مدل‌سازی ناشناخته، روش‌های تشخیص عیب مبتنی بر رؤیتگر مدل‌گزشی^۳ به‌طور گسترده در سال‌های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۳]. پیشنهاد اولیه در مورد استفاده از رؤیتگر مدل‌گزشی رؤیتگر مدل‌گزشی برای تشخیص عیب در مرجع [۱۴] نشان داده شد که در آن رؤیتگر مدل‌گزشی با این فرض که حالت‌های سیستم در دسترس است، طراحی شده است. در مراجع [۱۵] و [۱۶]، نویسندگان سعی در ایجاد رؤیتگر مدل‌گزشی برای سیستم‌هایی با عدم قطعیت داشتند. هنگامی که یک عیب رخ می‌دهد، مدل‌گزشی از بین می‌رود و باقیمانده از مقدار صفر منحرف می‌شود. از طرف دیگر، رؤیتگر مدل‌گزشی پیشنهادی در مرجع [۱۷]، می‌تواند با طراحی مناسب، دستیابی به سطح لغزش را حتی پس از حضور عیب حفظ کند. بنابراین عیب‌های ورودی عملگر و در خروجی اندازه‌گیری را می‌توان با اصطلاح معادل دینامیک رویت شده بدون عیب تحت شرایط خاص، بازسازی کرد. با این حال، نیاز به یک تغییر پارامتر است و همچنین می‌بایست سیستم به‌طور دقیق شناخته شده باشد. در تحقیقات مختلفی روش‌های تشخیص عیب مبتنی بر رؤیتگر مدل‌گزشی بطور گسترده توسعه یافته است [۱۸، ۱۹]. با این حال، تقریباً همه این رویکردها عمدتاً روی عیب با اندازه بزرگ متمرکز شده‌اند. تحقیقات در مورد تشخیص و جداسازی عیب‌های اولیه کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است و هنوز هم یک چالش برای روش‌های تشخیص عیب مبتنی بر مدل باقی مانده است، زیرا آن‌ها در مرحله اولیه تقریباً مورد توجه نیستند و اثرات آن‌ها به مانده‌ها به احتمال زیاد توسط عدم قطعیت‌های سیستم پنهان می‌شوند. در مرجع [۲۰]، یک ساختار دیفرانسیلی غیرخطی برای بدست آوردن ساختار سیستم معرفی و عیب حسگر با استفاده از فیلتر، شناسایی شد و سپس رؤیتگر مدل‌گزشی برای تخمین خطای حسگر بر اساس سیستم فیلتر شده طراحی شده است. در مرجع [۲۱]، نویسندگان طرحی را برای برآورد عیب‌های سنسور برای هر دو حالت حلقه باز پایدار و سیستم ناپایدار پیشنهاد دادند. مشکل تشخیص اولیه عیب با استفاده از رؤیتگر مدل‌گزشی‌ها نیز در مرجع [۲۲] مورد بررسی قرار گرفته است. رؤیتگر مدل‌گزشی با مرتبه بالا برای تخمین عیب‌های سنسور در مرجع [۲۳] طراحی شده است. در مرجع [۲۴] نشان داده شده است که اگر شرایط خاصی در ماتریس توزیع عیب و عدم قطعیت برآورده شود، می‌توان عدم قطعیت سیستم را کاملاً از عیب جدا کرد و بازسازی ورودی محرک را انجام داد. در این مقاله از این روش برای تشخیص عیب در عملگرهای مدل راکتور شیمیایی همزن دار استفاده می‌گردد. در مرجع [۲۵] یک روش شناسایی و تشخیص عیب چندگانه برای کنترل تحمل‌پذیر عیب چند گانه در راکتورهای شیمیایی ارائه شده است و برای تخمین دینامیک‌های خروجی روشی ارائه نشده است و تمام دینامیک‌ها قابل اندازه‌گیری فرض شده است. در این مقاله روشی برای تشخیص عیب و کنترل سیستم مبتنی بر روش پیش‌بین غیرخطی ارائه شده که در یک فرآیند صنعتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. روش کنترلی مبتنی بر روش پیش‌بین غیرخطی برای سیستم‌های غیرخطی حالت ناپایدار مانند فرآیند راکتور همزن شیمیایی که برای واکنش‌های شیمیایی گرم‌زدایی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، طراحی می‌گردد. از طرفی در لحظات شناسایی عیب در ورودی فرآیند، از ساختار کنترلی انتگرالی تناسبی فازی استفاده می‌گردد. نوآوری این مقاله در استفاده از کنترل پیش‌بین غیر خطی و آرایه یک ساختار یکپارچه از رویکرد تشخیص و کنترل تحمل‌پذیر عیب است. همچنین روش پیشنهادی مبتنی بر خروجی اندازه‌گیری است که توسط فیلتر کالمن خنثی^۴ به‌دست می‌آید که به نسبت سایر ساختارهای فیلتر کالمن، زمان همگرایی سریع‌تری دارد. به‌منظور شناسایی هرگونه عیب در رفتار عادی فرآیند نیز ساختاری بر اساس رؤیتگر عیب مدل‌گزشی که یک روش مناسب نسبت به محاسبه خطای حد آستانه محسوب می‌شود، طراحی می‌گردد. همچنین ساختار این مقاله به پنج بخش تقسیم می‌شود؛ در بخش مقدمه مسئله پژوهش، تشریح تحقیقات در زمینه تحقیق مورد نظر و روش کلی پیشنهاد شده برای رسیدن به هدف مطلوب ارائه شده است، در بخش دوم روابط ریاضی مدل‌سازی راکتور شیمیایی مطرح می‌شود. بخش سوم اصول طراحی روش تحمل‌پذیر عیب مبتنی بر روش پیش‌بین غیرخطی طراحی می‌گردد. در بخش چهارم در فضای شبیه‌سازی نرم‌افزار متلب، نتایج کنترلی بر سیستم راکتور شیمیایی همزن دار مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت و در بخش پنجم با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نتیجه‌گیری مقاله، بیان خواهد شد.

۲- مدل رآکتور همزن‌دار شیمیایی

یک واکنش برگشت‌ناپذیر و گرمازای تبدیل A به B در یک رآکتور با حجم ثابت که به وسیله یک جریان مایع خنک می‌شود، اتفاق می‌افتد. مواد خوراک ورودی C_{A0} در دمای T_0 در یک نرخ جریان حجمی ثابت q ، محصولات هم در همان جریان حجمی q از رآکتور خارج می‌شوند. فرض می‌شود مخلوط حاصله به اندازه کافی در داخل رآکتور همگن‌سازی شده باشد. در مخزن رآکتور شیمیایی همزن‌دار به دلیل تفاوت بین دمای مخزن رآکتور و دمای مایع رآکتور، گرما افزایش و یا کاهش می‌یابد. اغلب حرارت ناشی از مایع از طریق یک همزن متحرک که مایع را با سرعت بالا به گردش در می‌آورد، منتقل می‌شود. جریان خنک‌کننده در یک نرخ جریان q_c و در یک دمای تغذیه T_{c0} و دمای خروجی مایع خنک‌کننده T_c است. در شکل (۱) ساختار مخزن شیمیایی همزن‌دار نشان داده شده است.



شکل (۱): تصویری شماتیک از رآکتور همزن‌دار [۱]

Figure (1): Schematic illustration of a stirrer reactor [1]

واکنش‌های انجام شده در رآکتورهای همزن‌دار به صورت پیوسته در نظر گرفته شده از نوع ترکیب مواد A، B و C به صورت $\begin{cases} A \rightarrow B \\ A \rightarrow C \end{cases}$ است، یعنی ماده A باید طی واکنشی به شدت گرماده به دو ماده B و C تبدیل شود. سپس مقدار اضافه ماده A که در واکنش شرکت نکرده است، به صورت سرباره در جدا کننده، جدا می‌شود و دوباره به صورت ورودی وارد رآکتور اولی شده و در حالی که دوباره به واکنش تزریق می‌شود، نقش ورودی را برای رآکتور اول ایفا می‌کند. مدل‌سازی ریاضی برای این فرآیند به وسیله موازنه جرم و انرژی فرموله شده و یک معادله سازنده و مناسب را معرفی می‌کند. معادلات مدل‌سازی CSTR شامل توابع غیرخطی دمای مخزن (T) و غلظت مواد (C) است. برای طراحی کنترلی یک چنین فرآیند غیرخطی، یکی از روش‌ها نشان دادن سیستم غیرخطی به عنوان یک خانواده از مدل‌های خطی است. رابطه تغییرات دمای مخزن اول را می‌توان به صورت رابطه (۵) به دست آورد [۱]:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{F_{10}}{V_1} (T_{10} - T_1) + \frac{F_r}{V_1} (T_3 - T_1) + \frac{\Delta H_1}{\rho C_p} k_1 e^{\frac{-E_1}{RT_1}} C_{A1} + \frac{Q_1}{\rho C_p V_1} + \frac{\Delta H_2}{\rho C_p} k_2 e^{\frac{-E_2}{RT_1}} C_{A1} \quad (1)$$

که در آن دمای رآکتور اول و F_{10} نرخ جریان تغذیه شده به تانک مخزن اول، T_{10} دما جریان تغذیه شده به مخزن V_1 حجم مخزن، ΔH_1 گرمای واکنش، P چگالی، C_p ظرفیت گرمایی، K_1 فاکتور پیش نمایی واکنش، E_1 انرژی فعال‌سازی واکنش و R ثابت گاز و C_{A1} غلظت ماده A در مخزن اول، T_2 دمای جداکننده و F_r نرخ جریان بازیافت شده از جداکننده به رآکتور اول است [۱].

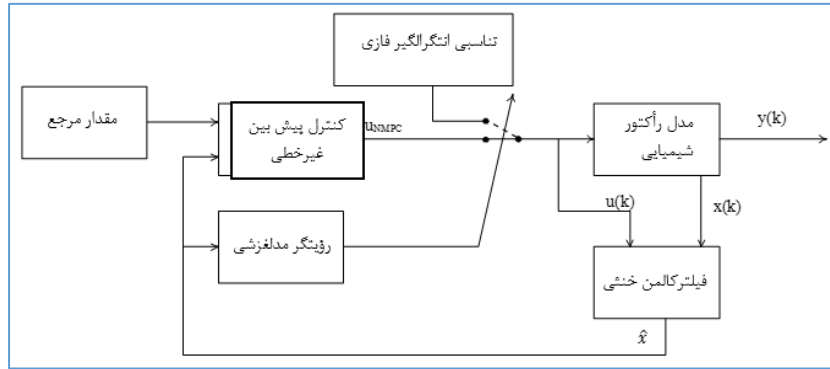
$$\frac{dC_{A1}}{dt} = \frac{F_{10}}{V_1} (C_{A10} - C_{A1}) + \frac{F_r}{V_1} (C_{Ar} - C_{A1}) + k_1 e^{\frac{-E_1}{RT_1}} C_{A1} - k_2 e^{\frac{-E_2}{RT_1}} C_{A1} \quad (2)$$

$$\frac{dC_{B1}}{dt} = \frac{-F_{10}}{V_1} C_{B1} + \frac{F_r}{V_1} (C_{Br} - C_{B1}) + k_2 e^{\frac{-E_2}{RT_1}} C_{A1} \quad (3)$$

که در آن غلظت ماده B در مخزن اول، C_{Br} غلظت گونه B در جریان بازیافتی است.

$$\frac{dC_{C1}}{dt} = \frac{-F_{10}}{V_1} C_{C1} + k_2 e^{\frac{-E_2}{RT_1}} C_{A1} + \frac{F_r}{V_1} (C_{Cr} - C_{C1}) \quad (4)$$

که در آن غلظت ماده C مخزن اول و C_{Cr} غلظت گونه C در جریان بازیافتی است:



شکل (۲): ساختار کنترلی و تخمین‌گر فرآیند راکتور شیمیایی همزن‌دار
Figure (2): Control structure and estimator of stirrer chemical reactor process

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{F_1}{V_2} (T_1 - T_2) + \frac{F_{20}}{V_2} (T_{20} - T_2) + \frac{\Delta H_2}{\rho C_p} k_1 e^{\frac{-E_1}{RT_1}} C_{A1} C_{A2} - \frac{\Delta H_1}{\rho C_p} k_2 e^{\frac{-E_2}{RT_1}} C_{A2} + \frac{Q_2}{\rho C_p V_2} \quad (5)$$

که در آن ΔH_2 گرمای واکنش و K_2 فاکتور پیش‌نمایی واکنش در راکتور دوم است [۱].

$$\begin{aligned} \frac{dC_{A2}}{dt} &= \frac{F_1}{V_2} (C_{A1} - C_{A2}) + \frac{F_r}{V_2} (C_{A20} - C_{A2}) + k e^{\frac{-E_1}{RT_1}} C_{A2} - k_2 e^{\frac{-E_2}{RT_1}} C_{A2} \\ \frac{dC_{B2}}{dt} &= \frac{-F_{20}}{V_2} C_{B2} + \frac{F_1}{V_2} (C_{Br} - C_{B1}) + k e^{\frac{-E_1}{RT_1}} C_{A2} \\ \frac{dC_{C2}}{dt} &= \frac{-F_1}{V_2} (C_{C1} - C_{C2}) + \frac{F_{20}}{V_2} C_{C2} + k e^{\frac{-E_2}{RT_1}} C_{A2} \\ \frac{dT_3}{dt} &= \frac{F_2}{V_3} (T_2 - T_3) + \frac{Q_3}{\rho C_p V_3} - \frac{H_{vap} F_{rm}}{V_3} \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن H_{vap} گرمای تبخیر است. همچنین روابط $C_{Ar} = \frac{a_A C_{A3}}{K}$ و $C_{Br} = \frac{a_B C_{B3}}{K}$ ، $C_{Cr} = \frac{a_C C_{C3}}{K}$ تعریف می‌گردد که در آن a_i نوسانات نسبی مواد است [۱].

۳- طراحی کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب

در این بخش روش طراحی پیشنهادی مبتنی بر رویکرد پیش‌بین با در نظر داشتن شناسایی عیب ارائه می‌شود. ساختار کنترلی پیشنهادی برای کنترل فرآیند راکتور شیمیایی همزن‌دار مبتنی بر کنترل‌کننده پیش‌بین تحمل‌پذیر عیب به صورت شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق شکل (۲)، متغیرهای فرآیند غیرخطی راکتور شیمیایی همزن‌دار توسط فیلتر کالمن خنثی تخمین‌زده می‌شود. دینامیک‌های تخمین‌زده شده در ساختار کنترلی^۵ کنترل پیش‌بین که وظیفه کنترل فرآیند راکتور شیمیایی همزن‌دار و رؤیتگر مرتبط با عیب که وظیفه شناسایی عیب را دارد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. کنترل‌کننده پیش‌بین ساختار کنترلی پیش‌بین است. هدف از سیستم کنترل مدل پیش‌بین این است که خروجی پیش‌بینی شده را تا حد امکان به خروجی سیگنال مرجع نزدیک کند. برای به‌دست آوردن مقادیر سیگنال کنترلی باید تابع هدف کنترل‌کننده پیش‌بین حداقل گردد. برای این کار باید مقادیر پیش‌بینی شده خروجی را به صورت تابعی از مقادیر گذشته ورودی و خروجی و سیگنال‌های فرمان کنترلی در فواصل زمانی آینده، به‌دست آورد که این کار توسط انتخاب مدل و جای‌گذاری آن در تابع هدف انجام می‌شود. رؤیتگر عیب نیز با در نظر داشتن تغییرات دینامیک‌های سیستم، وظیفه شناسایی عیب و تشخیص آن را برعهده دارد. در ساختار کنترلی پیشنهادی، با رخداد عیب در سیستم و شناسایی آن، کنترل‌کننده تناسبی انتگرال‌گیر فازی به حلقه کنترلی اضافه شده و در آن لحظه وظیفه دارد تا سیستم را برای حداقل کردن اثرات عیب کنترل کند.

۳-۱- طراحی فیلتر کالمن خنثی و رویتگر عیب مبتنی بر مدل‌غزشی

در صورتی که مدل مورد پیش‌بینی غیرخطی باشند، تخمین‌گر فیلتر کالمن کارایی پایینی خواهد داشت به این دلیل که کوواریانس در عمل خطی‌سازی مدل غیرخطی افزایش می‌یابد. به این منظور در این مقاله از روش فیلتر کالمن خنثی استفاده می‌گردد. در این روش نمونه‌گیری قطعی استفاده می‌شود تا مجموعه مینیمالی از نقاط حول میانگین را جمع‌آوری کند. سپس این نقاط در تابع غیرخطی وارد شده تا میانگین و کوواریانس جدید حاصل شود. نتیجه برای سیستم‌های قطعی با قطعیت بیشتری مقدار میانگین و کوواریانس را ارائه می‌کند. تخمین حالت و کوواریانس با کمک میانگین و کوواریانس فرآیند به‌دست می‌آیند. روابط فیلتر کالمن خنثی در [۲۶] بیان شده است.

در ادامه به طراحی رویتگر عیب پرداخته می‌شود. رویتگر مدل‌غزشی با دریافت ورودی‌های مدل پیش‌بین خود را به‌روز می‌نماید و مسئله بهینه‌سازی جدید را حل می‌نماید. به این ترتیب اثر عیب افت کارایی محرک‌ها به‌صورت فعال طی چرخه واحد تخمین عیب، ناظر و کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی جبران می‌شود. هم‌چنین به‌خاطر استفاده از جبران فیدبک در پیش‌بین غیرخطی کنترل‌کننده طراحی شده نسبت به نامعینی‌های موجود در آن مقاوم می‌شود. مدل سیستم در فضای حالت به فرم رابطه فضای حالت غیرخطی زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + f(x, t) + Bu(t) + Df_a(t) + E\Delta\psi(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (7)$$

که $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^p$, $f_a(t) \in R^h$ و $\Delta\psi(t) \in R^r$ به ترتیب به عنوان دینامیک‌های سیستم، ورودی کنترلی و خروجی و بردار عیب محرک و نامعینی مدل در نظر گرفته می‌شود. در اینجا فرض می‌شود که در تمام ورودی‌ها عیب رخ می‌دهد. شروط مربوط به قابلیت استفاده از این روش به صورت زیر است [۲۶]:

فرض (۱): در صورتی که مدل را با ماتریس‌های A و B و C و D نمایش دهیم، ماتریس P با حل معادلات ریکاتی زیر به‌دست می‌آید:

$$A^T P + PA - PBB^T X + Q = 0 \quad (8)$$

به نحوی که همه مقادیر ویژه ماتریس $A - BB^T P$ سمت چپ محور موهومی قرار گیرند. ماتریس P متقارن است و پاسخ پایدار ساز معادله فوق محسوب می‌شود. در این رویتگر بردار L و ماتریس G به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

بردار L شامل مقادیر ویژه ماتریس $A - BB^T P$ است. ماتریس بهره $G = B^T P$ در نظر گرفته می‌شود. ماتریس L باید مطابق فرض اول دارای بعد $n \times p$ باشد.

فرض (۲): با فرض اینکه ماتریس D به عنوان ماتریس ضریب عیب و ماتریس F رابطه $D^T P = FC$ برقرار باشد.

فرض (۳): شرط لیبشیتز برقرار باشد.

فرض (۴): شرط وجود حد بالا برای عیب برقرار باشد.

با در نظر داشتن فرض‌های مذکور، مؤلفه‌های جدید دینامیک‌های سیستم را با تغییر پارامتر زیر در نظر می‌گیریم:

$$z = Tx = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, w = Sy = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

هر کدام از ماتریس‌های فوق به صورت ماتریس زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$TAT^{-1} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}, TB = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}, TE = \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix}, SCT^{-1} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

در ماتریس‌های فوق ابعاد ماتریس T و S و Z_1 و Z_2 و w_1 و w_2 و A_1 و A_2 و A_3 و A_4 و B_1 و E_1 و C_1 و C_4 به ترتیب برابر با $n \times n$ و $p \times p$ و r و $n-r$ و r و $p-r$ و $r \times r$ و $r \times (n-r)$ و $r \times (n-r)$ و $(n-r) \times r$ و $(n-r) \times (n-r)$ و $r \times m$ و $r \times r$ و $r \times r$ و $(p-r) \times (n-r)$ است. ابعاد ماتریس T نیز به دو زیر ماتریس T_1, T_2 به ترتیب برابر $r^* \times n$ و $(n-r)^* \times n$ و S به صورت S_1, S_2 با ابعاد $r \times p$ و $(p-r) \times p$ شکسته می‌شود. حال با تعاریف انجام شده، معادلات دینامیکی مربوط به حالات جدید سیستم به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = TAT^{-1}z(t) + Tf(T^{-1}z, t) + TB(u(t) + f_a(t)) + TE\Delta\psi(t) \\ y(t) = CT^{-1}x(t) \end{cases} \quad (11)$$

حال سیستم به دو زیر سیستم زیر تقسیم می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = A_1 z_1 + A_2 z_2 + f_1(T^{-1}z, t) + B_1(u(t) + f_a(t)) + E_1 \Delta\psi(t) \\ w_1 = C_1 z_1 \end{cases} \quad (12)$$

$$\dot{z}_2 = A_3 z_1 + A_4 z_2 + f_2(T^{-1}z, t) + B_2(u(t) + f_a(t)) \quad (13)$$

$$w_2 = C_4 z_2$$

در روابط فوق $f_1(T^{-1}z, t) = T_1 f(T^{-1}z, t)$ و $f_2(T^{-1}z, t) = T_2 f(T^{-1}z, t)$ در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن روابط رؤیتگر به صورت رابطه فوق و با به دست آوردن Z_2 شناسایی دینامیک نامعینی یا عیب صورت می‌گیرد. با طراحی رؤیتگر به فرم روابط فوق و در نظر داشتن $w - \hat{w}$ به عنوان خطای تخمین خروجی می‌توان به اهداف شناساگر عیب دست یافت. معادلات (۱۳) را در قالب معادلات فضای حالت رؤیتگر لیونبرگر به فرم زیر بازنویسی کرده که در آن بهره L به عنوان بهره رؤیتگر معرفی می‌گردد.

$$\dot{\hat{z}}_2 = A_4 \hat{z}_2 + A_3 C_1^{-1} w_1 + f_2(T^{-1}\hat{z}, t) + B_2 u(t) + L(w_2 - \hat{w}_2) \quad (14)$$

$$\hat{w}_2 = C_4 \hat{z}_2$$

اگر $e_1 = z_1 - \hat{z}_1$ و $e_1 = z_1 - \hat{z}_1$ به عنوان خطای تخمین حالت تعریف کنیم، آنگاه دینامیک‌های خطای تخمین حالت، قبل از رخداد عیب محرک، می‌تواند به فرم زیر به دست آید:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 = \dot{z}_1 - \dot{\hat{z}}_1 = A_1 z_1 + A_2 z_2 + f_1(T^{-1}z, t) + B_1(u(t) + f_a(t)) + E_1 \Delta \psi(t) - A_1 \hat{z}_1 - A_2 \hat{z}_2 - f_1(T^{-1}\hat{z}, t) + \\ B_1 u(t) - (A_1 - A_1^s) C_1^{-1} (w_1 - \hat{w}_1) - v_1 = A_1^s e_1 + A_2 e_2 + [f_1(T^{-1}z, t) - f_1(T^{-1}\hat{z}, t)] + E_1 \Delta \psi(t) - v_1 = \\ A_1^s e_1 + A_2 e_2 + \Delta f_1 + E_1 \Delta \psi(t) - v_1 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\dot{e}_2 = \dot{z}_2 - \dot{\hat{z}}_2 = A_3 z_1 + A_4 z_2 + f_2(T^{-1}z, t) - A_4 \hat{z}_2 - A_1 C_1^{-1} w_1 - f_2(T^{-1}\hat{z}, t) - L(w_2 - \hat{w}_2) = (A_4 - LC_4) e_2 + [f_2(T^{-1}z, t) - f_2(T^{-1}\hat{z}, t)] = (A_4 - LC_4) e_2 + \Delta f_2 \quad (16)$$

با در نظر گرفتن مدل فضای حالت اصلی سیستم و شروط رؤیتگر عیب، زمانی که سیستم بدون عیب باشد، دینامیک‌های خطای e_1 و e_2 به طور مجانبی پایدار هستند، اگر ماتریس‌های $P_1 > 0$ و $P_2 > 0$ و ضرایب مثبت اسکالر α_1 و α_2 از حل مسأله نامساوی خطی زیر به دست آیند:

$$\Lambda := \begin{bmatrix} \Pi_1 + \frac{1}{\alpha_1} P_1 P_1 & P_1 A_2 \\ A_2^T P_1 & \Pi_2 + \frac{1}{\alpha_2} P_2 P_2 + a I_{n-r} \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

در روابط فوق، $\Pi_1 = A_1^s T P_1 + P_1 A_1^s$ و $\Pi_2 = (A_4 - LC_4) P_2 + P_2 (A_4 - LC_4)$ در نظر گرفته شده است. در واقع با در نظر گرفتن شروط فوق مشتق تابع لیاپانوف به فرم $V = V_1 + V_2 = e_1^T P_1 e_1 + e_2^T P_2 e_2$ منفی شده و پایداری تضمین می‌گردد. نامساوی فوق می‌تواند به مسئله LMI تبدیل گردد.

$$\begin{bmatrix} X + X^T & P_1 & P_1 A_2 & 0 \\ P_1 & -\alpha_1 I & 0 & 0 \\ A_2^T P_1 & 0 & M & P_2 \\ 0 & 0 & P_2 & -\alpha_2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

که در آن $X = P_1 A_1$ ، $Y = P_2 L$ و $M = A_4^T P_2 + P_2 A_4 - C_4^T Y^T - Y C_4 + a I$ است. در صورتی که عیب محرک در زمان t_f رخ دهد، آنگاه دینامیک‌های خطا به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{e}_1 = A_1^s e_1 + A_2 e_2 + \Delta f_1 + E_1 \Delta \psi(t) - v_1 \quad (19)$$

$$\dot{e}_2 = (A_4 - LC_4) e_2 + \Delta f_2 + B_2 f_a \quad (20)$$

با رویت e_2 می‌توان دریافت که e_2 توسط عیب محرک f_a تحت تأثیر قرار گرفته است. در مورد تعیین زمان رخداد عیب، فرض کرده f_a شامل برداری با m داده باشد که مربوط به m ورودی است. به منظور جداسازی عیب یک ساختار رؤیتگر اصلاح شده در نظر گرفته می‌شود. برای هر عیب غیر صفر دو رؤیتگر مدلغزشی (رؤیتگر مذکور) طراحی می‌شود که یکی برای سیستم اول و دیگری برای سیستم دومی طراحی می‌شود. برای عیب محرک i ام روش رؤیتگر رؤیتگر مدلغزشی برای سیستم به فرم معادله زیر است.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_1^i = A_1 \hat{z}_1^i + A_2 \hat{z}_1^i + f_1(T^{-1}\hat{z}^i, t) + B_1 u(t) + (A_1 - A_1^s) C_1^{-1} (w_2 - \hat{w}_2) + v_1^i \\ \hat{w}_1^i = C_1 \hat{z}_1^i \end{aligned} \quad (21)$$

در رابطه فوق \hat{z} و \hat{w} به ترتیب تخمین حالت و خروجی حاصل از تخمین‌گر ایزوله‌کننده است. در روش تشخیص عیب و روند ایزوله‌سازی به جای رؤیتگر لیونبرگر، از روش رؤیتگر مدلغزشی استفاده شده که به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_2^i = A_4 \hat{z}_2^i + A_3 C_1^{-1} w_1 + f_2(T^{-1}\hat{z}^i, t) + B_2 u(t) + L(w_2 - \hat{w}_2) \\ \hat{w}_2^i = C_4 \hat{z}_2^i \end{aligned} \quad (22)$$

که L به عنوان بهره رؤیتگر است. در روند تخمین عیب، به منظور تخمین با حداقل خطا باید شرایط برای مدل برقرار گردد.

۲-۳- طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی و کنترل‌کننده عیب

در این بخش به طراحی روش کنترلی پیش‌بین غیرخطی پرداخته می‌شود. سیستم نامتغیر با زمان، گسسته و غیرخطی افاین را به صورت رابطه (۲۳) در نظر می‌گیریم:

$$x(k+1) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) + gd(x(k))d(k) \quad y(k) = Cx(k) \quad (23)$$

در رابطه فوق $y(k)$ ، $d(k)$ ، $x(k)$ ، $u(k)$ به ترتیب دارای ابعاد m و سایر متغیرها دارای ابعاد n هستند که متغیر ورودی کنترل، حالت، اغتشاش معلوم و خروجی هستند و f و g توابع غیرخطی مدل هستند. پیش‌بینی یک گام متغیرهای حالت در طول افق پیش‌بینی N_p می‌تواند از روابط زیر به دست آید:

$$\hat{x}(k+1|k) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) + g_d(x(k))d(k) \quad (24)$$

به طور کلی برای سایر لحظات می‌توان پیش‌بینی را به فرم زیر تعریف کرد:

$$\hat{x}(k+j|k) = f(\hat{x}(k+j-1|k)) + g(\hat{x}(k+j-1|k))u(k+j-1|k) + \dots + g_d(\hat{x}(k+j-1|k))d(k+j-1|k), j = 2, 3, \dots, N_p \quad (25)$$

با توجه به اینکه $\hat{x}(k+j-1|k)$ شامل تابع غیرخطی از داده‌های پیشین است، ممکن است برای پیش‌بینی بیش از یک گام، رابطه (۲۵) راه‌حل مناسبی ارائه ندهد و برای F و g غیرخطی رابطه فوق دستیابی به $U(K+1)$ و مؤلفه‌های آینده ورودی را به صورت تحلیلی، پیچیده کند؛ به همین علت با تقریب زدن آینده متغیرهای حالت با اجزای مسیر مرجع آن‌ها، پیش‌بینی یک گام را برای $j \geq 2$ به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\hat{x}(k+j|k) = f(w_x(k+j-1|k)) + g(w_x(k+j-1|k))u(k+j-1|k) + gd(w_x(k+j-1|k))d(k+j-1|k) \quad (26)$$

که در آن w_x مسیر مرجع حالات است که طبق (۲۷) حاصل می‌شود:

$$w_x(k+j|k) = \alpha w_x(k+j-1|k) + (1-\alpha)x_{sp}, j = 1, 2, \dots, N_p - 1 \quad (27)$$

که در آن $\alpha \in [0, 1]$ ضریب نرم کردن، $w_x(k|k) = x(k)$ و x_{sp} مقدار مطلوب متغیرهای حالت است. به این ترتیب مدل پیش‌بین متغیرهای حالت فرآیند غیرخطی افاین به صورت زیر قابل بیان است:

$$\hat{x}(k+1|k) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) + gd(x(k))d(k) \quad (28)$$

$$\hat{x}(k+j|k) = f(w_x(k+j-1|k)) + g(w_x(k+j-1|k))u(k+j-1|k) + \dots$$

$$gd(w_x(k+j-1|k))d(k+j-1|k), j = 2, 3, \dots, N_p \quad (29)$$

در ادامه برای کم کردن بار محاسبات بهینه‌سازی غیرخطی، استراتژی کنترل پلکانی در فرمول‌بندی پیش‌بین غیرخطی به کار برده می‌شود؛ ابتدا نمونه کنترل در گام k ام را به صورت $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ تعریف می‌کنیم. طبق استراتژی کنترل پلکانی، نمو ورودی کنترل در آینده می‌تواند به صورت زیر اعمال شود:

$$\Delta u(k+j|k) = \beta \Delta u(k+j-1|k) = \beta^j \Delta u(k) = \beta^j \Delta; \quad j = 1, 2, \dots, N_p \quad (30)$$

که در آن β یک عدد حقیقی مثبت قابل تنظیم است و ثابت پله نامیده می‌شود. با به کار بردن این استراتژی در پیش‌بین غیرخطی به جای به دست آوردن بردار توالی کنترل $[\Delta u(k) \dots \Delta u(k+N_p-1|k)]$ که N_p متغیر مستقل طراحی کنترل دارد، فقط کافی است که اولین جزء آن یعنی $\Delta u(k)$ محاسبه شود؛ به این ترتیب حجم محاسبات پیش‌بین غیرخطی به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین رابطه (۳۱) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$u(k+j|k) = u(k-1) + \sum_{i=0}^{j-1} \Delta u(k+i|k) \quad (31)$$

و با به کارگیری (۳۱) رابطه (۲۷) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\hat{x}(k+j|k) = f(w_x(k+j-1|k)) + g(w_x(k+j-1|k))(u(k-1) + \sum_{i=0}^{j-1} \beta^i \Delta) + gd(w_x(k+j-1|k))d(k+j-1|k) = f(w_x(k+j-1|k)) + g(w_x(k+j-1|k)).(k-1) + gd(w_x(k+j-1|k)).(k+j-1|k) + (w_x(k+j-1|k)).\sum_{i=0}^{j-1} \beta^i \Delta = \hat{x}(k+j|k) + g(w_x(k+j-1|k)).\sum_{i=0}^{j-1} \beta^i \Delta \quad (32)$$

در رابطه (۳۲) رابطه $\hat{x}(k + j|k)$ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

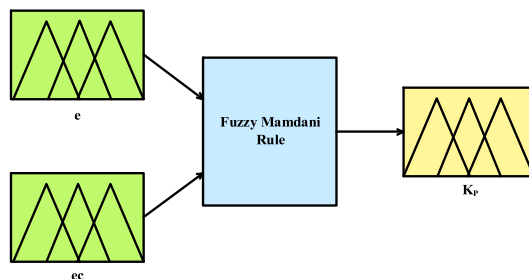
$$x(k + j|k) = f(w_x(k + j - 1|k)) + g(w_x(k + j - 1|k)).(k - 1) + gd(w_x(k + j - 1|k)) d(k + j - 1|k) \quad (33)$$

در رابطه فوق، $\hat{x}(k + j|k)$ فقط شامل داده‌های معلوم در زمان k است و بخش دوم آن مرتبط با نمو ورودی در زمان‌های آینده است. بنابراین با در نظر داشتن این رابطه، داده‌های نامعلوم به صورت خطی جدا می‌شود و مقادیر Δ به دست می‌آید. در این بخش روند طراحی پیش‌بین غیرخطی ارائه شد و در بخش بعدی به طراحی تخمین‌گر حالت خنثی پرداخته می‌شود. در این قسمت با رخداد عیب در سیستم، در لحظه تشخیص عیب، کنترل‌کننده تناسبی انتگرال‌گیر فازی طراحی شده در ادامه این بخش، فعال شده و تلاش کنترلی حاصل از آن به منظور رفع نوسانات ناشی از عیب و ایجاد پایداری روی خروجی، به ورودی سیستم اعمال می‌شود. با استفاده از روش فازی پیشنهادی، پارامترهای کنترل‌کننده را می‌توان به صورت خودکار تحت شرایط مختلف فرآیند و یا حتی در شرایط بروز اغتشاش تنظیم کرد، این الگوریتم با استفاده از قوانین فازی، ضرایب کنترل‌کننده‌ی تناسبی انتگرال‌گیر را تنظیم می‌کند و به این صورت با وجود عیب در عملگر ورودی، کنترل‌کننده به صورت آنلاین تنظیم می‌شود. در شکل (۳) ساختار کلی از ورودی و خروجی کنترل‌کننده نشان داده شده است. شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) بیانگر توابع عضویت ورودی و خروجی کنترل‌کننده فازی برای ضریب K_p هستند و برای دیگر ضرایب کنترل‌کننده، توابع عضویت نیز به همین صورت هستند و قوانین حاکم بر آن، در جدول (۱) نشان داده شده است. ورودی‌های این کنترل‌کننده شامل سیگنال خطا و تغییرات خطا است. هر ورودی و خروجی دارای ۷ تابع عضویت به صورت متغیرهای زبانی هستند؛ NB، NM، NS، ZE، PS، PM و PB که بیانگر خیلی منفی، منفی متوسط، کم منفی، صفر، کم مثبت، متوسط مثبت و خیلی مثبت هستند. قوانین فازی در جدول (۱) نشان داده شده است. در ساختار کنترل‌کننده ترکیبی تناسبی انتگرال‌گیر-فازی، خروجی هر کنترل‌کننده فازی به عنوان عامل ترکیبی با مقدار ضرایب کنترل‌کننده تناسبی انتگرال‌گیر قسمت قبل جمع شده و به عنوان ورودی کنترلی به سیستم مدل اعمال شده است.

۴- شبیه‌سازی

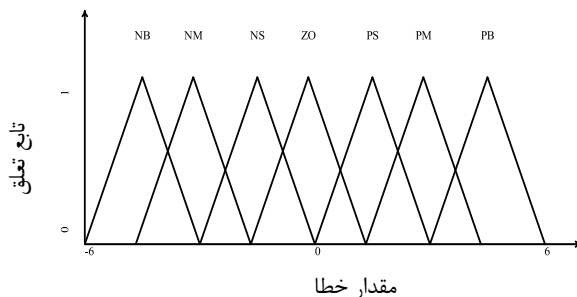
در این بخش نتایج شبیه‌سازی سیستم تحت شرایط مختلف عیب بررسی شده است. به منظور ارزیابی روش کنترلی تحمل‌پذیر عیب با وجود رؤیتگر تشخیص عیب مبتنی بر مد لغزشی، بخش‌های مختلف سیستم و اثر کنترل‌کننده با حضور فیلتر کالمن خنثی مورد بررسی قرار گرفته شده است. در ابتدا مدل بدون در نظر گرفتن عیب در عملگر و اثرات نویز در خروجی ارائه شده و سپس با در نظر داشتن عیب در عملگر ورودی خوراک و ورودی‌های کنترلی بررسی می‌شود. در نهایت اثرات نویز اندازه‌گیری در خروجی تحلیل می‌شود. در ابتدای این بخش به مسئله شناسایی عیب و بررسی فرض‌های آن پرداخته شده است. فرض‌های رؤیتگر عیب برای سیستم راکتور شیمیایی همزن‌دار به صورت زیر مورد بررسی قرار داده می‌شود.

بررسی فرض (۱): مدل راکتور شیمیایی همزن‌دار را با معادلات فضای حالت و ماتریس‌های A ، B ، C و D در نظر گرفته و مطابق حل معادلات ریگاتی مسئله رؤیتگر، ماتریس P به عنوان پاسخ منحصر به فرد معادله ریگاتی محاسبه می‌گردد. در این سیستم $n = 12$ و $p = 4$ ابعاد دینامیک‌ها و خروجی سیستم است.

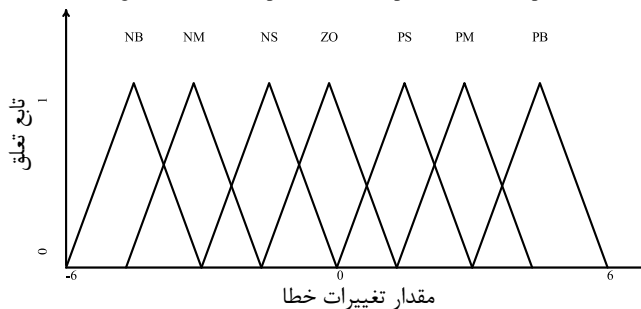


شکل (۳): ساختار کنترل‌کننده فازی

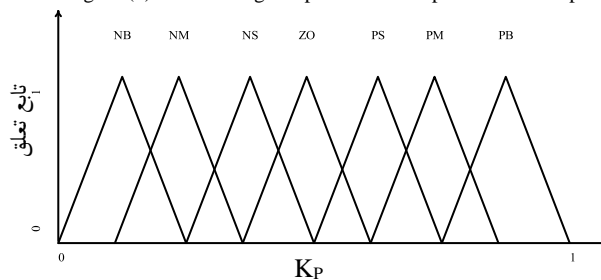
Figure (3): structure of fuzzy controller



شکل (۴): تابع عضویت ورودی خطا برای K_p
Figure (4): Error input membership function for K_p



شکل (۵): تابع عضویت ورودی تغییرات خطا برای K_p
Figure (5): Error changes input membership function for K_p



شکل (۶): تابع عضویت خروجی برای K_p
Figure (6): Output membership function for K_p

Table (1): Fuzzt rull table for (a) Proportional term (b) Integral term

جدول (۱): جدول قوانین حاکم بر کنترل کننده فازی

(الف) ترم تناسبی

ce/e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

(ب) ترم انتگرال گیر

ce/e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB

بررسی فرض (۲): با فرض اینکه ماتریس D به عنوان ماتریس ضریب عیب به صورت 1×12 ماتریس F مطابق فرض ۲ به صورت زیر به دست می‌آید ($D^T P = FC$):

$$F = [90102 \quad 65362 \quad 41298 \quad 23918] \quad (34)$$

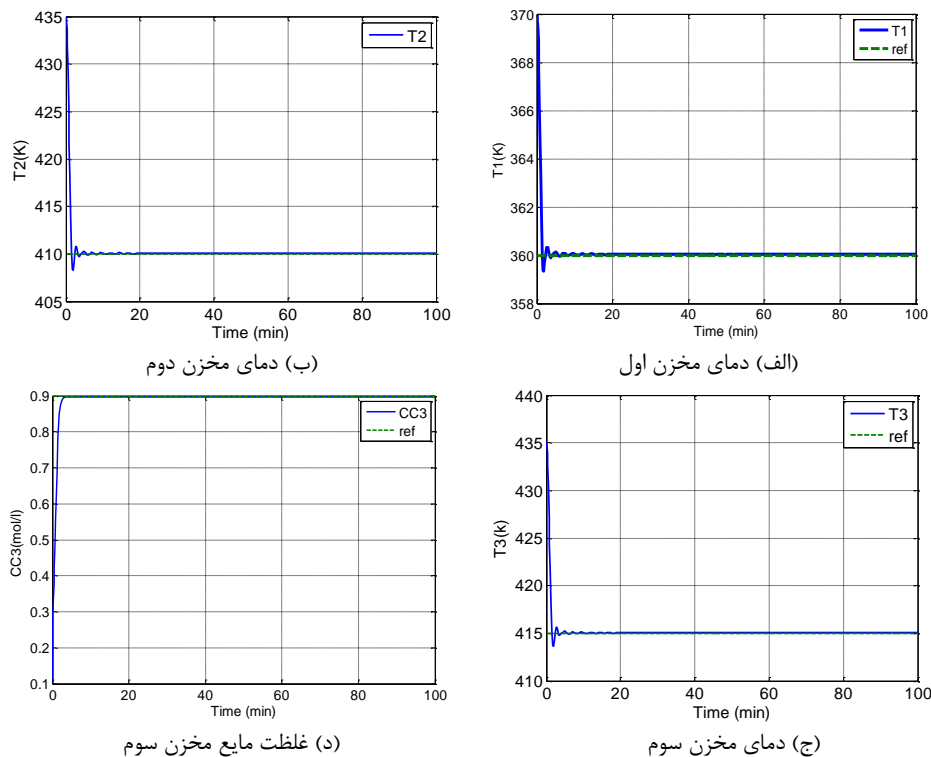
بررسی فرض (۳): با در نظر گرفتن برقراری کراندار بودن دینامیک‌های سیستم، شرط لیپشیتز برقرار است. بررسی فرض (۴): برقراری شرط منوط به وجود حد بالا برای عیب است که این فرض برقرار است چون عیب دارای تابعی همگرا به مقدار عددی است. در این بخش با استفاده از ساختار کنترلی پیشنهادی به شبیه‌سازی مدل ایده‌آل (بدون اثرات عیب و نویز) پرداخته می‌شود. پارامترهای مدل راکتور شیمیایی همزن‌دار به صورت جدول (۲) نشان داده شده است [۱]. شبیه‌سازی در مدت ۱۰۰ دقیقه و با نرخ نمونه‌برداری ۱ دقیقه انجام شده است و در این حالت هیچ‌گونه عیب یا نویزی وارد سیستم نمی‌شود. در شکل (۷) خروجی‌های سیستم یعنی T_1, T_2, T_3 و CC_3 نسبت به مقدار مطلوبشان رسم شده است. در این حالت مشاهده می‌شود کنترل‌کننده پیش‌بین، ورودی کنترلی مناسب را به سیستم اعمال کرده که نتایج ورودی کنترلی Q_1, Q_2 و Q_3 در شکل (۸) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی، دمای T_1, T_2, T_3 و غلظت ماده در مخزن سوم در مدت زمان‌های $2/5, 3$ و $3/1$ دقیقه به مقدار مطلوب $360, 410, 415$ درجه کلوین و $0/9$ مول بر لیتر رسیده است. خروجی‌های مدل بدون نوسان و فراجهدش به مقدار نهایی رسیده‌اند. در بخش بعدی اثرات عیب در عملگر ورودی گرمایش و خوراک فرآیند مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۹) خروجی‌های فرآیند یعنی T_1, T_2, T_3 و CC_3 با در نظر داشتن عیب در عملگر ورودی گرمایش و خوراک در حالت حضور و عدم حضور کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب، رسم شده است. در این راستا ورودی خوراک به مدت ۲۰ دقیقه در دقیقه ۳۰ دچار عیب شده و به ۵۰ درصد مقدار اصلی خود رسیده و Q_1 در لحظه ۳۰ دقیقه به مدت ۵ دقیقه به صورت نمایی ۱۰ درصد مقدار خودش تقلیل یافته است.

Table (2): Model Parameters [1]

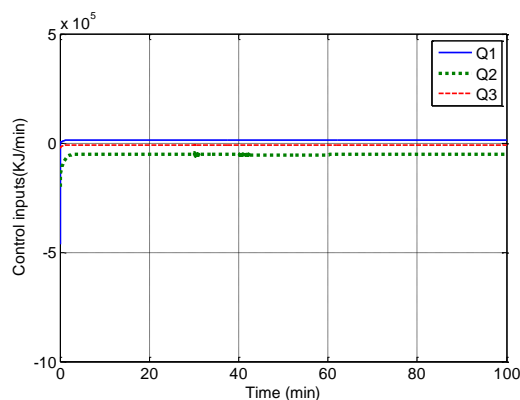
جدول (۲): پارامترهای مدل [۱]

سمبل	مقدار	مقدار	پارامتر
C_A	مول بر لیتر	$0/0882$	غلظت محصول
T	کلوین	$441/2$	دمای راکتور
q_c	لیتر بر دقیقه	۱۰۰	نرخ مایع خنک‌کننده
Q	لیتر بر دقیقه	۱۰۰	نرخ جریان خوراک
C_{A0}	مول بر لیتر	۱	غلظت خوراک
T_0	کلوین	۳۵۰	دمای خوراک
T_{C0}	کلوین	۳۵۰	دمای مایع خنک‌کننده ورودی
V	لیتر	۱۰۰	حجم راکتور شیمیایی همزن‌دار
hA	کالری بر دقیقه بر کلوین	7×10^5	مدت انتقال حرارت
K_0	بر دقیقه	$7/2 \times 10^{10}$	ثابت سرعت واکنش
$\frac{E}{R}$	کلوین	10^4	مدت فعال سازی انرژی
$-\Delta H$	کالری بر مول	-2×10^5	حرارت واکنش
P, P_C	گرم بر لیتر	10^3	چگالی مایع
C_P, C_{PC}	کالری بر گرم بر کلوین	۱	گرمای ویژه



شکل (۷): خروجی‌های مدل بدون در نظر گرفتن اثرات عیب و نویز اندازه‌گیری

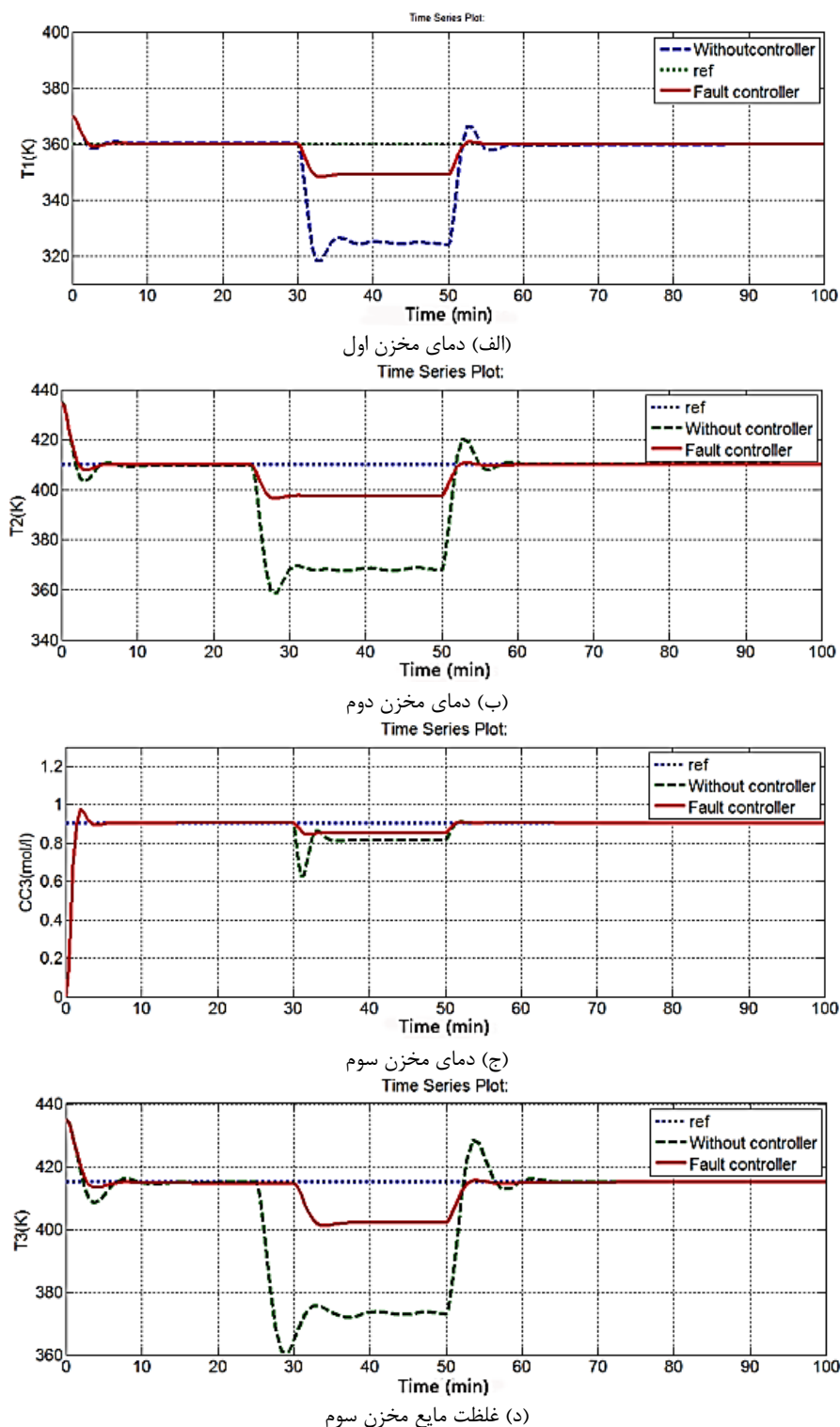
Figure (7): System outputs without considering the effects of fault and noise measurement (a) First tank temperature, (b) Second tank temperature, (c) Third tank temperature, (d) Third tank liquid concentration



شکل (۸): ورودی‌های کنترلی بدون در نظر گرفتن اثرات عیب و نویز اندازه‌گیری

Figure (8): Control inputs without considering the effects of measurement fault and noise

از طرفی Q2 در لحظه‌ی ۲۵ دقیقه به مدت ۵ دقیقه ۱۰ درصد مقدار خودش رسیده و دچار عیب شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌گردد نوسانات خروجی‌ها در لحظات رخداد عیب شدید است و مقدار فراجش‌ها و فروجهش‌ها قابل چشم‌پوشی نیست و نشان می‌دهد که کنترل‌کننده N کنترل پیش‌بین به تنهایی قادر نیست در لحظات رخداد عیب عملکرد دینامیک‌های خروجی سیستم را کنترل کند و مقادیر خروجی در لحظات رخداد عیب از مقدار مطلوب فاصله گرفته و در آن شرایط مقادیر با نوسان به مقادیر دیگری همگرا می‌شوند. با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد که عیب تأثیر نامطلوبی بر سیستم می‌گذارد و ضرورت وجود بخش تشخیص و شناسایی عیب و همچنین ساختار کنترلی برای لحظات رخداد عیب احساس می‌گردد. مطابق نتیجه به‌دست آمده از شبیه‌سازی، در دقیقه ۳۰ عیب در عملگر ورودی خوراک منجر به کاهش دامنه خروجی T2 شده و پس از ۵ دقیقه نوسانات به حداقل رسیده و پس از رفع عیب به مقدار مطلوب باز می‌گردد.

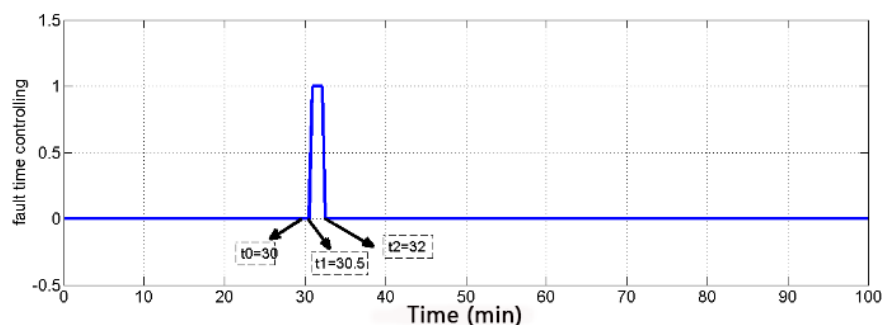


شکل (۹): خروجی‌های مدل با در نظر گرفتن اثرات عیب

Figure (9): Model outputs considering the fault effects of (a) first tank temperature, (b) second tank temperature, (c) third tank temperature, (d) third tank liquid concentration.

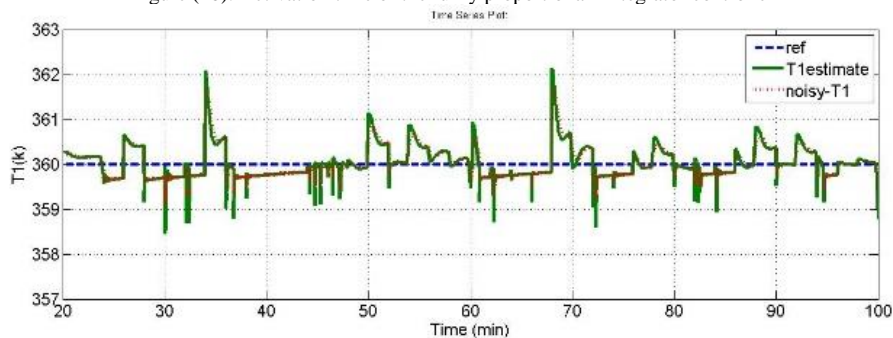
در زمان ۳۰ دقیقه عیب رخ داده است و در ۳۰ ثانیه بعد عیب توسط مشاهده‌گر عیب مبتنی بر مد لغزشی شناسایی شده و با تشخیص عیب، در ۲ دقیقه بعد کنترل‌کننده تناسبی انتگرال‌گیر فازی سیستم را با وجود عیب کنترل کرده و به دینامیک مطلوب بازمی‌گرداند. در شکل (۱۰) زمان فعال شدن کنترل‌کننده عیب تناسبی انتگرال‌گیر فازی نشان داده شده است. مطابق شکل

فوق، در لحظه t_0 خطا رخ می‌دهد و در لحظه t_1 خطا از حد اشباع مرتبط با رخداد عیب بیشتر شده و کنترل‌کننده عیب تناسبی انتگرال‌گیر فازی به‌منظور واکنش به عیب، فعال می‌شود و در این حالت تا لحظه t_2 ورودی کنترلی مناسب جهت حداقل ساختن نوسانات را فراهم می‌سازد. در لحظات قبل از وقوع عیب دینامیک‌های سیستم به دمای مطلوب رسیده و با رخداد عیب، سیستم کنترل عیب فعال شده و در لحظه ۳۰ دقیقه در مقدار ثابتی از فرآیند می‌ماند و نهایتاً پس از اینکه عیب پایان یافت، دینامیک خروجی به مقدار مطلوب خود باز می‌گردد. در مرحله بعد نویز اندازه‌گیری با واریانس ۱ و میانگین صفر در خروجی دینامیک T1 و T2 اعمال می‌شود. فیلتر کالمن در لحظات مختلف، با وجود نویز، دینامیک را به خوبی مطابق شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تخمین می‌زند. با توجه به نتایج حاصل‌شده، فیلتر کالمن خنثی خروجی سیستم را به خوبی تخمین زده است. همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، خروجی T1 با ۲ واحد خطا نسبت به مقدار مطلوب ۳۶۰ درجه دچار نویز شده و کنترل‌کننده با وجود نویز عملکرد خوبی دارد. این مسأله در مورد خروجی T2 نیز صدق می‌کند. در این قسمت اثر نویز در تمام خروجی‌ها در لحظات مشخص سیستم بررسی می‌شود. در این راستا نویز (n) با میانگین صفر و واریانس یک، در بازه‌های زمانی بزرگتر از ۴۰، ۵۰ و ۵۰ دقیقه بر روی خروجی‌های T1، T2 و T3 اعمال شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بازه ۱۰۰ دقیقه برای سیستم راکتور شیمیایی به‌صورت شکل‌های (۱۳) نمایش داده شده است.



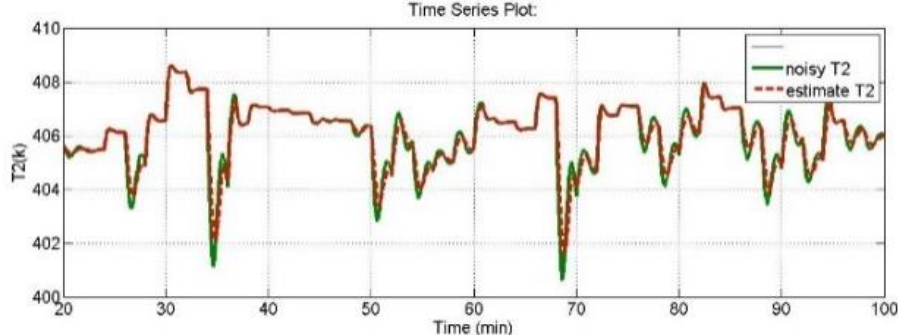
شکل (۱۰): زمان فعال شدن کنترل‌کننده تناسبی انتگرال‌گیر فازی

Figure (10): Activation time of the fuzzy proportional- integrator controller



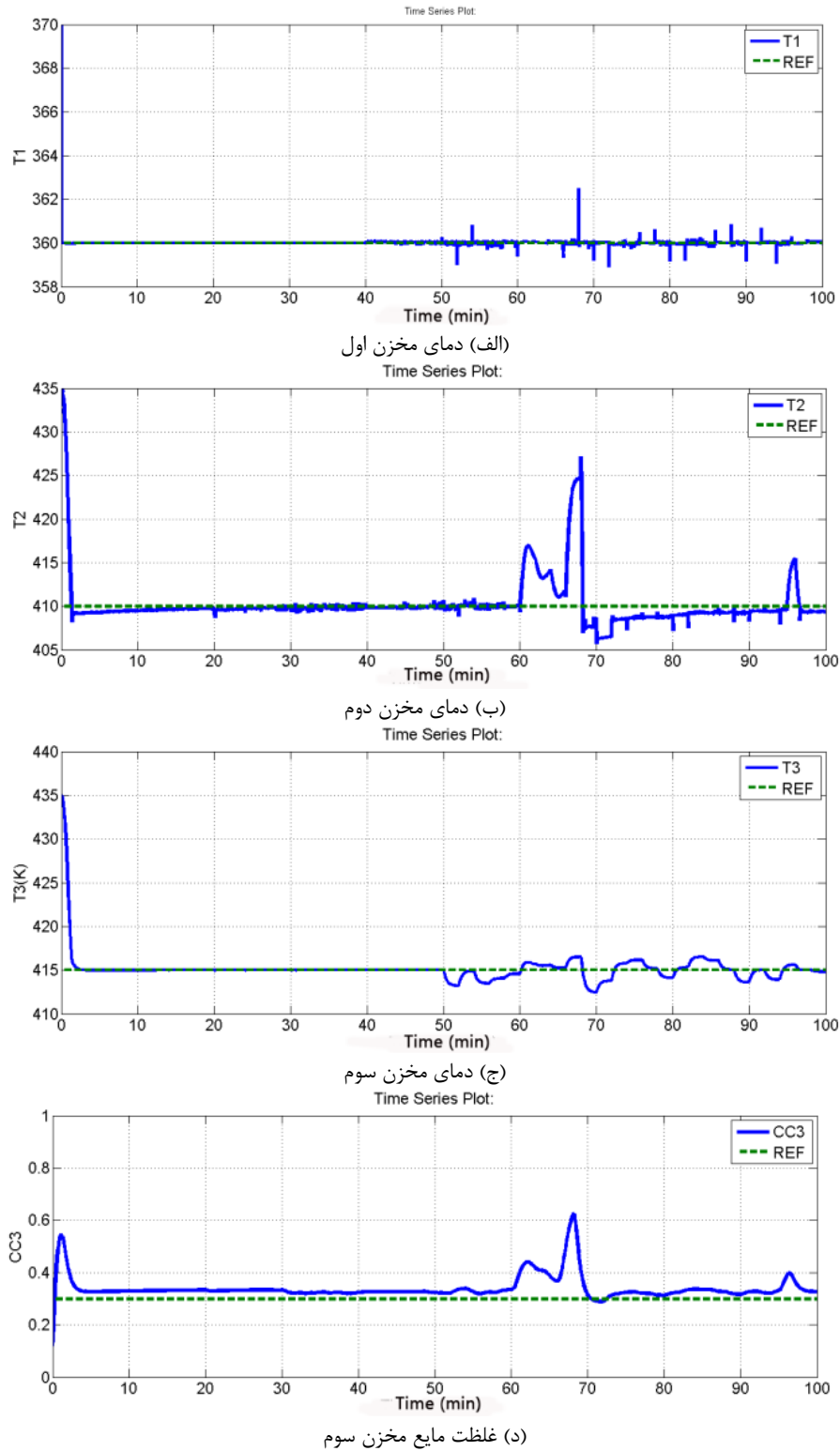
شکل (۱۱): خروجی T1 با در نظر گرفتن نویز اندازه‌گیری

Figure (11): Output T1 considering measurement noise



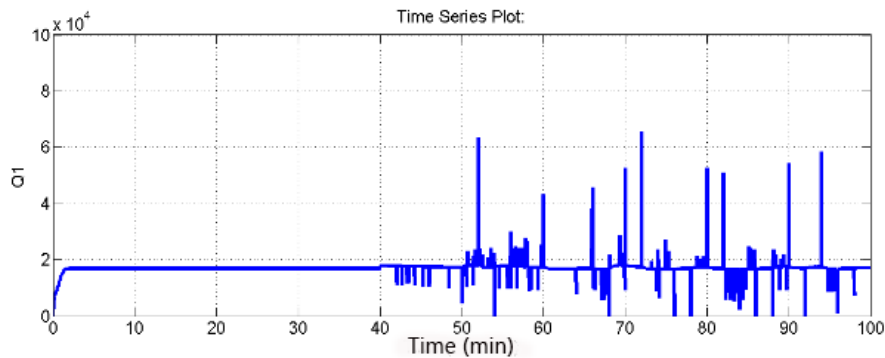
شکل (۱۲): خروجی T2 با در نظر گرفتن نویز اندازه‌گیری.

Figure (12): T2 output considering measurement noise.

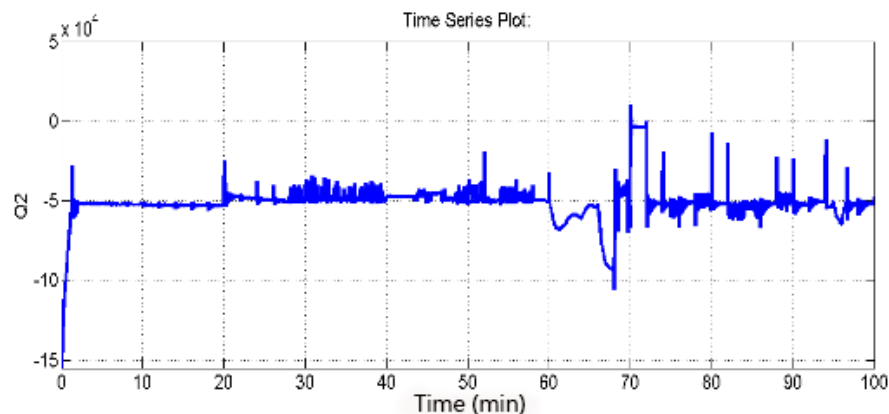


شکل (۱۳): خروجی‌های مدل در حضور نویز در لحظه ۴۰ دقیقه

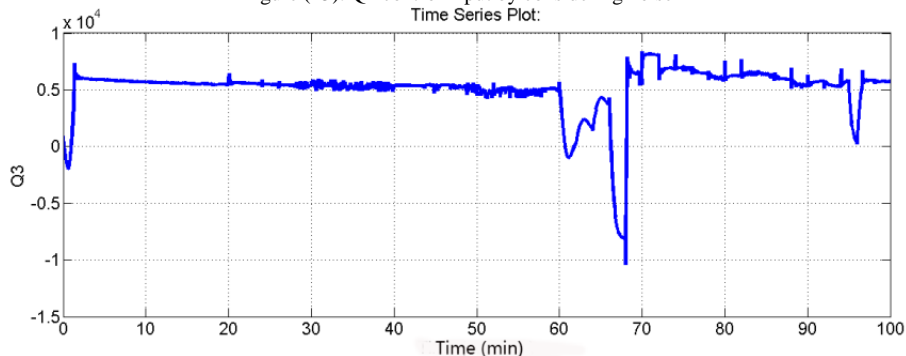
Figure (13): System outputs in the presence of noise at 40 minutes (a) First tank temperature, (b) Second tank temperature, (c) Third tank temperature, (d) Third tank liquid concentration



شکل (۱۴): ورودی کنترلی Q1 در حضور نویز
Figure (14): Q1 control input by considering noise



شکل (۱۵): ورودی کنترلی Q2 در حضور نویز
Figure (15): Q2 control input by considering noise



شکل (۱۶): ورودی کنترلی Q3 در حضور نویز
Figure (16): Q3 control input by considering noise

همان‌طور که مشاهده می‌شود با رخداد نویز در بخش‌های مختلف سیستم به‌طور هم‌زمان، کنترل‌کننده ورودی کنترلی متناسب را به مدل اعمال می‌کند. در شکل‌های (۱۴) الی (۱۶) ورودی‌های کنترلی نشان داده شده است. با توجه به عملکرد فیلتر کاملن خنثی در تخمین دینامیک‌های خروجی با وجود نویز در بازه‌های مختلف زمانی، ورودی‌های کنترلی بر مبنای روش پیشنهادی N کنترل پیش‌بین منجر به دستیابی خروجی‌های فرآیند در بازه‌ای حول مقدار مطلوب شده است و نتایج از جنبه تحلیل نویز قابل قبول است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش پیشنهادی جهت کنترل تحمل‌پذیر عیب فرآیند راکتور شیمیایی هم‌زن‌دار در حضور عیب عملگر پرداخته شده است. چالش‌های موجود در این فرآیند صنعتی شامل تنظیم دمای مخزن‌های سری، وجود اغتشاش و نویز در حسگرهای

اندازه‌گیری و رخداد عیب در عملگر ورودی کنترلی در زمان‌های نامشخص است. در این پژوهش فیلتر کالمن خنثی به‌منظور تخمین دینامیک‌های سیستم مورد استفاده قرار گرفته و از مشاهده‌گر عیب مبتنی بر مد لغزشی جهت تشخیص عیب استفاده شده است. کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی پیشنهادی، ورودی کنترلی مناسب را در حالت بدون عیب برای سیستم محاسبه می‌کند. در لحظات رخداد عیب در عملگر، کنترل‌کننده‌ی تناسبی انتگرال‌گیر فازی فعال شده و رفتار سیستم را به‌منظور کاهش نوسانات ناشی از رخداد عیب کنترل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده در فضای متلب نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی در بازه زمانی رخداد عیب است. شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف فرآیند انجام شده است که سیستم در چالش‌های مختلف ارزیابی شود. حداقل نوسانات و دستیابی به مقادیر مطلوب در شرایط رخداد عیب در فرآیند، ازجمله نتایج مطلوب روش پیشنهادی است.

References

مراجع

- [1] R. Lakhani, C.R. Srinivasan, S. Ra, "Transient analysis of systems exhibiting inverse response and their control with CSTR as a case study", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 20, no. 1, pp. 89–99, 2020 (doi:10.11591/ijeecs.v20.i1.pp89-99).
- [2] J. Lan and R.J. Patton, "A new strategy for integration of fault estimation within fault-tolerant control", *Automatica*, vol. 69, pp. 48–59, 2016 (doi:10.1016/j.automatica.2016.02.014).
- [3] B. Kuipers, K. Astrom, "The composition and validation of heterogeneous control laws", *Automatica*, vol. 30, no. 2, pp. 233–49, 1994 (doi:10.1016/0005-1098(94)90027-2).
- [4] B. Aufderheide, B. W. Bequette, "Extension of dynamic matrix control to multiple models", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 27, no. 8–9, pp. 1079–1096, 2003 (doi:10.1016/S0098-1354(03)00038-3).
- [5] Z. Tian, K.A. Hoo, "Multiple model-based control of the Tennessee-Eastman process", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 44, no. 9, pp. 3187–3202, April 2005 (doi:10.1021/ie0496939).
- [6] P. Lu, E.J.V. Kampen, C. de Visser, Q. Chu, "Aircraft fault-tolerant trajectory control using incremental nonlinear dynamic inversion", *Control Engineering Practice*, vol. 57, pp. 126–141, Dec. 2016 (doi: 10.1016/j.conengprac.2016.09.010).
- [7] A.J. Gonzalez, G. Nencioni, B.E. Helvik, A. Kamisinski, "A fault-tolerant and consistent sdn controller", *Proceeding of the IEEE/GLOBECOM*, pp. 1-6, Washington, DC, USA, Dec. 2016 (doi: 10.1109/glocom.20-16.7841496).
- [8] E.P. Nahas, M.A. Henson, D.E. Seborg, "Nonlinear internal model control strategy for neural network models", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 16, no. 12, pp. 1039–1057, Dec. 1992 (doi:10.1016/0098-1354(92)80022-2).
- [9] J.M.R. Chintu, R.K. Sahu, "Differential evolution optimized fuzzy PID controller for automatic generation control of interconnected power system", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1120, pp. 123–132, Feb. 2020 (doi:10.1016/j.procont.2020.08.006).
- [10] C.T. Chao, N. Sutarna, J.S. Chiou, C.J. Wang, "An optimal fuzzy PID controller design based on conventional PID control and nonlinear factors", *Applied Sciences*, vol. 9, no. 6, Article Number: 1224, 2019 (doi: 10.3390/app9061224).
- [11] R. Mehrad, S.M. Kargar, "Integrated model predictive fault-tolerant control, and fault detection based on the parity space approach for a reverse osmosis desalination unit", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 42, no. 10, pp. 1882-1894, Jan. 2020 (doi:10.1177/0142331219898942).
- [12] X. Yang, J.M. Maciejowski, "Fault-tolerant model predictive control of a wind turbine benchmark", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 20, pp. 337–342, Jan. 2012 (doi:10.3182/20120829-3-MX-2028.00134).
- [13] R. Senthil, K. Janarthanan, J. Prakash, "Nonlinear state estimation using fuzzy Kalman filter", *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 45, no. 25, pp. 8678–8688, Dec. 2006 (doi:10.1021/ie0601753).
- [14] H. Mekki, O. Benzineb, D. Boukhetala, M. Tadjine, M. Benbouzid, "Sliding mode based fault detection, reconstruction and fault tolerant control scheme for motor systems", *ISA Transactions*, vol. 57, pp. 340–351, July 2015 (doi: 10.1016/j.isatra.2015.02.004).
- [15] H. Alwi, C. Edwards, C.P. Tan, "Fault detection and fault-tolerant control using sliding modes", Springer, London, 2011 (doi:10.1007/978-0-85729-650-4).
- [16] H. Yang, M. Saif, "Fault detection in a class of nonlinear systems via adaptive sliding mode observer", *Proceeding of the IEEE/ICSMC*, vol. 3, pp. 2199-2204, Vancouver, BC, Canada, Oct. 1995 (doi: 10.1109/ICSMC.1995.538107).
- [17] J. Lan, R.J. Patton, "Integrated design of robust fault estimation and fault-tolerant control for linear systems", *Proceedings of the IEEE/CDC*, pp. 5105–5110, 2015 (doi:10.1109/CDC.2015.7403018).

- [18] P. Mhaskar, J. Liu, P.D. Christofides, "Fault-tolerant process control", Methods and applications, Springer, 2013 (ISBN: 978-1-4471-4808-1).
- [19] Q. Shen, C. Yue, C. H. Goh, D. Wang, "Active fault-tolerant control system design for spacecraft attitude maneuvers with actuator saturation and faults", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 66, no. 5, pp. 3763–3772, May 2019 (doi:10.1109/TIE.2018.2854602).
- [20] M. Khalili, X. Zhang, M. M. Polycarpou, T. Parisini, Y. Cao, "Distributed adaptive fault-tolerant control of uncertain multi-agent systems", Automatica, vol. 87, pp. 142–151, Jan. 2018 (doi: 10.1016/j.automata.2017.09.002).
- [21] S. Ding, W.H. Chen, K. Mei, D.J. Murray-Smith, "Disturbance observer design for nonlinear systems represented by input-output models", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 67, no. 2, pp. 1222–1232, Feb. 2020 (doi:10.1109/TIE.2019.2898585).
- [22] W. Qi, G. Zong, H.R. Karimi, "Finite-time observer-based sliding mode control for quantized semi-markov switching systems with application", IEEE Trans. on Industrial Informatics, vol. 16, no. 2, pp. 1259–1271, Feb. 2020 (doi: 10.1109/TII.2019.2946291).
- [23] W. Chen, F.N. Chowdhury, "A synthesized design of sliding-mode and Luenberger observers for early detection of incipient", International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 24, no. 12, pp. 1021–1035, Dec. 2010 (doi:10.1002/acs.1170).
- [24] L. Fridman, A. Levant, J. Davila, "Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding-modes", International Journal of Systems Science, vol. 38, no. 10, pp. 773–791, Jan. 2007 (doi: 10.1080/00207720701409538).
- [25] S.M. Kargar, K. Salahshoor, M.J. Yazdanpanah, "Multiple model-based fault detection and diagnosis for nonlinear model predictive fault-tolerant control", International Journal of Systems Science, vol. 39, no. 10, pp. 7433–7442, Sept. 2014 (doi:10.1007/s13369-014-1252-y).
- [26] E.A. Wan, R.V.D. Merwe, "The unscented Kalman filter for nonlinear estimation", Proceeding of the IEEE/AS-SPCC, pp. 153–158, Lake Louise, AB, Canada, Oct. 2000 (doi: 10.1109/ASSPCC.2000.882463).

زیر نویس ها

-
1. Continuous stirred tank reactor (CSTR)
 2. Proportional integral derivative (PID)
 3. Sliding mode observer (SMO)
 4. Unscented Kalman filter
 5. Nonlinear model predictive controllers