

طراحی سیستم عیب‌یاب فرایند تبدیل هپتان به تولوئن با استفاده از الگوریتم فازی - ژنتیک

شکوفه طیبی*

تهران، پژوهشکده توسعه فناوریهای پالایش و فرآورش نفت خام، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

دریافت: ۹۳/۴/۱۴ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱

چکیده

طراحی یک سیستم عیب‌یاب دقیق، نقش بسزایی در افزایش ایمنی و کیفیت محصولات فرآیند دارد. با توجه به اهمیت موضوع، محققان به منظور تشخیص عیب، روش‌های متعددی را ارائه داده‌اند. در این مقاله، به طراحی سیستم عیب‌یاب بر اساس منطق فازی که مبتنی بر دانش فرایند و مستقل از مدل است، پرداخته شده‌است. در این بررسی، به منظور دستیابی به دقت بالاتر در تشخیص عیوب، مقادیر بهینه پارامترهای توابع تعلق فازی با الگوریتم ژنتیک به دست آمده است. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، به عیب‌یابی فرآیند تبدیل هپتان به تولوئن پرداخته شده است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که سیستم عیب‌یاب طراحی شده، توانایی تشخیص چهار عیب هم‌زمان را دارد.

واژگان کلیدی: تشخیص و شناسایی عیب، منطق فازی، الگوریتم ژنتیک، فرایند تبدیل هپتان به تولوئن

مقدمه

یکی از مشخصات سیستم‌های واقعی این است که به طور ناخواسته، در معرض عیوب و در حالت کلی هر رفتار غیرقابل پیش‌بینی قرار می‌گیرند. افزایش پیچیدگی و گسترش دستگاه‌های پیشرفته، موجب کاهش درجه‌ی اطمینان به اپراتورهای انسانی شده و بنابراین نیاز مداوم به سیستم‌های عیب‌یاب موثر، وجود دارد. به همین دلیل در چند دهه اخیر فعالیت‌های زیادی بر روی آن انجام شده و روش‌های متعددی برای آن در مراجع ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به سه گروه کلی که شامل روش‌های مبتنی بر مدل، روش‌های مبتنی بر داده و روش‌های مبتنی بر دانش فرایند، تقسیم نمود [۱]. اولین گروه از این تقسیم‌بندی، با استفاده از مدل فرایند به عیب‌یابی سیستم می‌پردازد و در صورت دقیق بودن مدل این امر به خوبی انجام می‌پذیرد. عیب‌یابی بر اساس گراف‌ها (SDG) [۲]، مشاهده‌گرها [۳] و درخت عیب [۴] از جمله این گروه به شمار می‌آید. علیرغم مزایایی که این گروه از سیستم عیب‌یاب دارند، بزرگ‌ترین کاستی این گروه آن است

*tayebish@ripi.ir

¹Signed Directed Graph



که دست‌یابی به یک مدل دقیق و قابل اعتماد برای اغلب فرایندهای صنعتی، مشکل و حتی در بعضی موارد غیر ممکن می‌باشد. گروه دوم، روش‌های مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی و یا ابتکاری^۱ می‌باشند که از جمله آن‌ها می‌توان به شبکه عصبی مصنوعی [۱] و تحلیل عناصر اصلی (PCA)^۲ [۵] اشاره نمود. گروه سوم از دسته‌بندی اشاره شده، روش‌های مبتنی بر دانش بوده که بر اساس استدلال‌های کیفی و خبره می‌باشد. راه‌کارهای مختلفی برای این نگرش پیشنهاد شده که شامل قوانین تشخیص عیب بوده که از ساختار فرآیند و یا شبیه‌سازی کیفی فرآیند، به دست می‌آیند. این قوانین با استفاده از نشانه‌ها به عیب‌یابی سیستم می‌پردازد. از جمله این روش‌ها می‌توان به سیستم خبره [۶] و منطق فازی [۷] اشاره نمود.

همان‌گونه که در بالا اشاره شد، یکی از روش‌های کیفی عیب‌یابی که نیاز به مدل ندارد، سیستم فازی می‌باشد. در تحقیقی، وایت^۳ و همکارش سیستم عیب‌یابی مبتنی بر سیستم استنتاجی تطبیقی فازی طراحی کرده و آن را روی یک فرآیند شیمیایی سیالاتی امتحان کرده و به نتایج قابل قبولی رسیدند [۸]. در تحقیقی دیگر، چنگ^۴ و همکارانش، با به‌کارگیری منطق فازی و درخت عیب، سیستم عیب‌یابی طراحی کردند که چهار عیب فرآیند TE را شناسایی می‌نماید [۹].

اصولاً یکی از ویژگی‌های روش عیب‌یاب مناسب تشخیص سریع چند عیب هم‌زمان، می‌باشد. بسیاری از روش‌های عیب‌یاب چنین قابلیت‌هایی ندارند. در این مقاله از منطق فازی برای تشخیص و شناسایی عیوب فرآیند تبدیل هپتان به تولوئن استفاده شده است و نشان داده می‌شود که این روش در تشخیص درست و سریع عیوب چندگانه، خوب عمل می‌کند. هم‌چنین برای انتخاب مناسب پارامترهای توابع عضویت، به منظور نتایج دقیق در سیستم عیب‌یاب طراحی شده، از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌کردن پارامترهای مجموعه‌های فازی استفاده می‌شود. در صورتی که تعداد متغیرهای قابل اندازه‌گیری در فرآیند به اندازه‌ای باشد که بین عیوب مختلف در سیستم تمایز ایجاد نماید، روش پیشنهادی حتی برای عیب‌یابی فرایندهای جامع نیز می‌تواند به کار برده شود. البته باید توجه داشت که در بسیاری از موارد، پیچیدگی‌های فرایندهای جامع و تعداد زیاد متغیرها موجب می‌شود که داده‌های شرایط پایا برای عیب‌یابی فرآیند کافی نباشد [۱].

طراحی سیستم عیب‌یاب فازی

در منطق فازی با استفاده از دانش و درک شهودی که از فرآیند وجود دارد به تعیین قوانین پرداخته و تشخیص عیب انجام می‌پذیرد.

یک سیستم عیب‌یاب فازی، شامل سه بخش می‌باشد که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود.

۱. فازی‌سازی: این مرحله، عملیات مربوط به تبدیل مقادیر صریح متغیرهای ورودی را به مقادیر فازی بین ۰ و ۱، با استفاده از مجموعه فازی را انجام می‌دهد. هر متغیر می‌تواند چندین مجموعه فازی داشته باشد که مقادیر خروجی از این مجموعه‌ها، درجه‌های عضویت مرتبط با هر مجموعه فازی را نشان می‌دهد.

¹heuristic

²Principal Component Analysis

³White

⁴Chang

در سیستم عیب‌یاب، متغیرهای ورودی نشانه‌های عیوب (متغیرهای قابل اندازه‌گیری در فرایند که به علت وجود عیب در سیستم از شرایط نرمال انحراف پیدا می‌کنند) و متغیرهای خروجی، عیوب تعریف شده در فرایند می‌باشند.

۲. پایگاه قواعد فازی: یک پایگاه قواعد فازی از مجموعه‌ای قواعد "اگر-آن‌گاه" تشکیل می‌شود که قواعد متغیرهای ورودی به سیستم فازی را به متغیرهای خروجی مرتبط می‌سازد. در سیستم عیب‌یاب مبتنی بر فازی، این قواعد بین عیوب و نشانه‌های آن بیان می‌شود. تعدد و پیچیدگی پایگاه به تعداد پارامترهای ورودی، تعداد مجموعه‌های فازی هر متغیر و پیچیدگی سیستم وابسته می‌باشد.

۳. استنتاج فازی: در مرحله استنتاج فازی، از منطق فازی برای ترکیب قواعد "اگر-آن‌گاه" در پایگاه قواعد فازی، استفاده می‌شود. به طور مثال:

اگر $S_{m,1}$ ، $S_{m,2}$ و ... و $S_{m,m}$ ، Sym_m باشد، آن‌گاه F_1 ، H_1 است.

اگر $S_{m,1}$ ، $S_{m,2}$ و ... و $S_{m,m}$ ، Sym_m باشد، آن‌گاه F_2 ، H_2 است.

اگر $S_{1,n}$ ، $S_{2,n}$ و ... و $S_{m,n}$ ، Sym_m باشد، آن‌گاه F_n ، H_n است.

که Sym_i ، برداری از میزان خطای متغیرهای ورودی (نشانه‌های عیوب) به سیستم فازی می‌باشد و m ، تعداد ورودی‌های به سیستم عیب‌یاب است. خطا به صورت تفاوت مقدار نرمال از مقدار حقیقی آن پارامتر تعریف می‌شود.

F_i ، برداری از متغیرهای خروجی (عیوب) از سیستم فازی می‌باشد و n ، تعداد خروجی‌های از سیستم عیب‌یاب است. $S_{i,j}$ ، مجموعه فازی i مین نشانه عیب در ارتباط با j مین عیب می‌باشد و H_j ، مجموعه فازی مربوط به j مین عیب است. بنابراین،

$$\mu_{H_h} = \prod \mu_{S_{i,j}} \quad (1)$$

که μ ، درجه تعلق مجموعه‌های فازی می‌باشد. متغیرهای خروجی با مقدار فازی بیش‌تر، نشان دهنده عیوب اصلی می‌باشند [۱۰].

از تابع تعلق گوسی، جهت تعیین مجموعه‌های فازی متغیرهای ورودی و خروجی سیستم عیب‌یاب فازی استفاده می‌شود. پنج مجموعه‌ی فازی NL (منفی بزرگ)، NS (منفی کوچک)، Z (صفر)، PS (مثبت کوچک) و PL (مثبت بزرگ) برای هر متغیر فازی در نظر گرفته شده است. برای مجموعه‌ی فازی منفی بزرگ، رابطه زیر را می‌توان ارائه نمود.

$$\mu_{NL} = \begin{cases} = 1 & \text{if } \bar{x} \leq C_N \\ = \exp(-.5((\bar{x} - C_N) / \sigma_N)^2) & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (2)$$

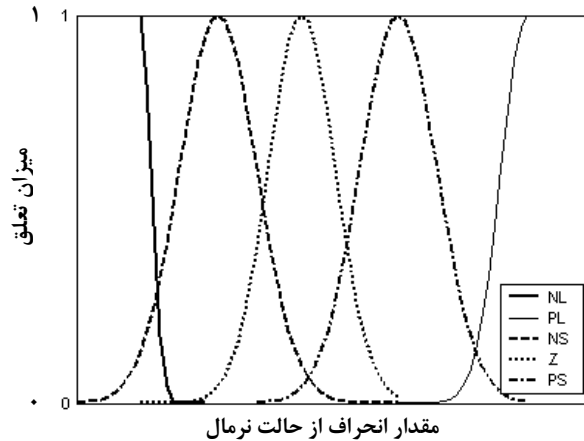
برای مجموعه فازی مثبت بزرگ رابطه زیر برقرار است.

$$\mu_{PL} = \begin{cases} = 1 & \text{if } \bar{x} \geq C_p \\ = \exp(-.5((\bar{x} - C_p) / \sigma_p)^2) & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (3)$$

و برای مجموعه‌های فازی صفر، منفی کوچک و مثبت کوچک، رابطه زیر را می‌توان ارائه کرد.

$$\mu_z = \exp(-.5((\bar{x} - C_z) / \sigma_z)^2) \quad (۴)$$

که \bar{x} ، میزان انحراف متغیر از مقدار نرمال، μ ، مقدار تعلق و C, σ ، پارامترهای تابع تعلق گوسی می‌باشند. شکل ۱، مجموعه‌های فازی به کار رفته در سیستم عیب‌یاب طراحی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. پنج مجموعه فازی گوسی به کار رفته در سیستم عیب‌یاب.

طراحی سیستم عیب‌یاب فازی-ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم جستجوی تصادفی مبتنی بر هوش مصنوعی می‌باشد که کاربرد فراوانی در مسائل بهینه‌سازی و جستجو دارد. در این الگوریتم، هر متغیر قابل تنظیم به عنوان یک ژن در نظر گرفته می‌شود و مجموعه‌ای از متغیرهای مسئله (ژن‌ها) تشکیل کروموزوم را می‌دهند. در شروع، جمعیت اولیه‌ای از کروموزوم‌ها به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. به منظور ارزیابی هر کروموزوم، تابع برازندگی^۱ که معیاری برای تشخیص صحت جواب‌ها می‌باشد، ارائه می‌شود. طی سه مرحله انتخاب^۲، جدایی^۳ و جهش^۴، نسل بعدی از نسل فعلی حاصل می‌شود. در مرحله انتخاب، امکان انتخاب کروموزوم‌هایی که دارای ارزش برازندگی بالاتری هستند، بیش‌تر می‌باشد. در مرحله جدایی، کروموزوم‌های دو فرد ممکن است از یک موقعیت که به طور تصادفی انتخاب می‌شود، قطع شده و دو بخش ابتدایی و انتهایی تولید کنند. سپس بخش‌های انتهایی با هم عوض شوند که حاصل این عمل، دو کروموزوم جدید می‌باشد. طی عمل جهش، یک کاراکتر از یک کروموزوم، از صفر به یک و یا از یک به صفر تبدیل می‌شود. اگر الگوریتم ژنتیک به طور صحیح و مناسب به کار برده شود، میانگین برازندگی جمعیت در هر مرحله تولید نسل، به سمت بهینه مطلق افزایش می‌یابد [۱۰].

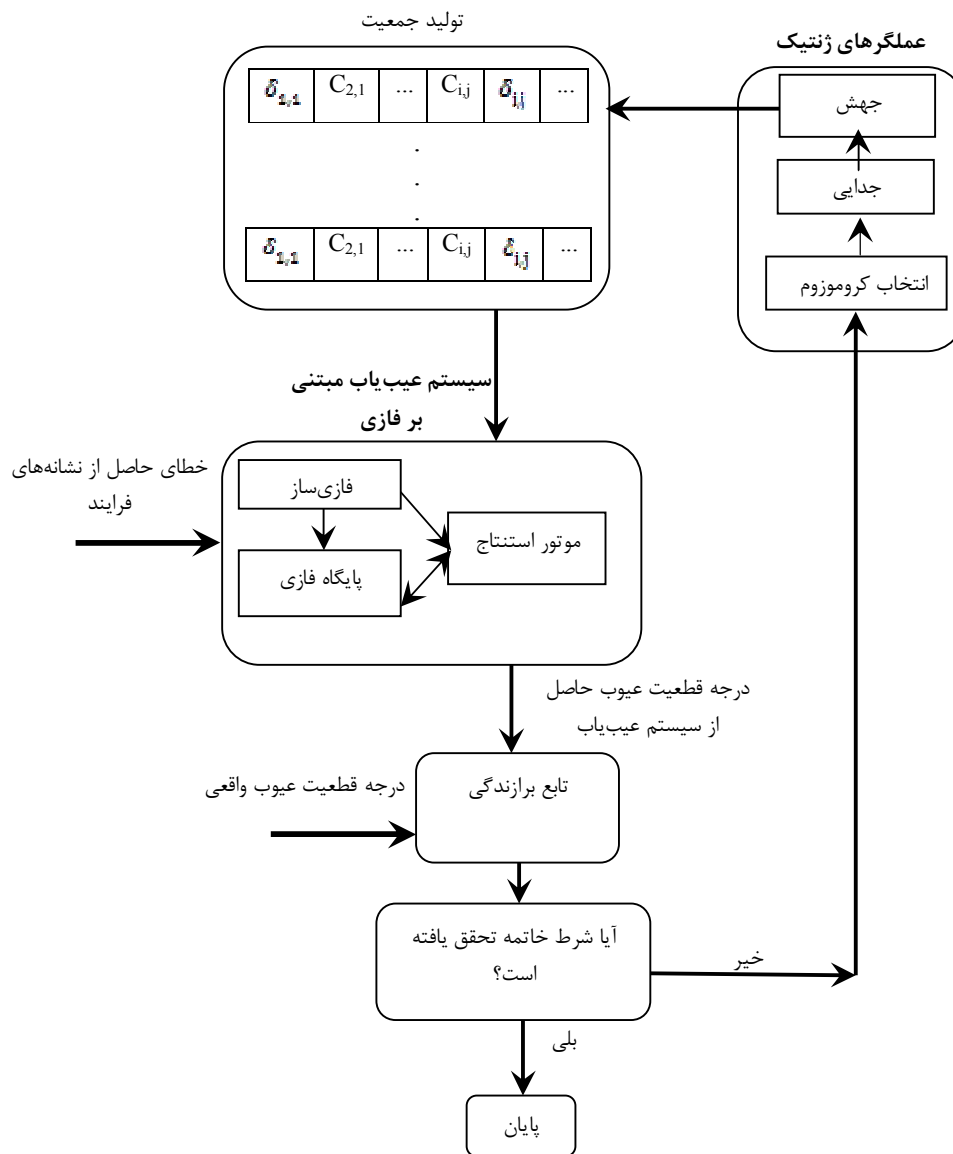
¹Fitness function

²Selection

³Cross over

⁴Mutation

مراحلی که در بالا به آن‌ها اشاره شد تا زمانی که شرط توقف ارضا شود، ادامه می‌یابد. در این مطالعه، شاخص تمام الگوریتم ژنتیک، رسیدن به حد تعیین شده نسل (۵۰) می‌باشد. از الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن پارامترهای تابع تعلق مجموعه‌های فازی سیستم عیب‌یاب، استفاده شده است. تابع برازندگی نیز، اختلاف ضریب قطعیت عیوب افتاده و عیوب اتفاق نیفتاده در سیستم می‌باشد. الگوریتم ژنتیک به کار رفته، این اختلاف را با تغییر در پارامترهای تابع تعلق مجموعه‌های فازی، ماکزیمم می‌نماید. بنابراین نتایج بهتر و دقیق‌تری در سیستم عیب‌یاب حاصل می‌شود. شکل ۲، الگوریتم کلی سیستم عیب‌یاب فازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.



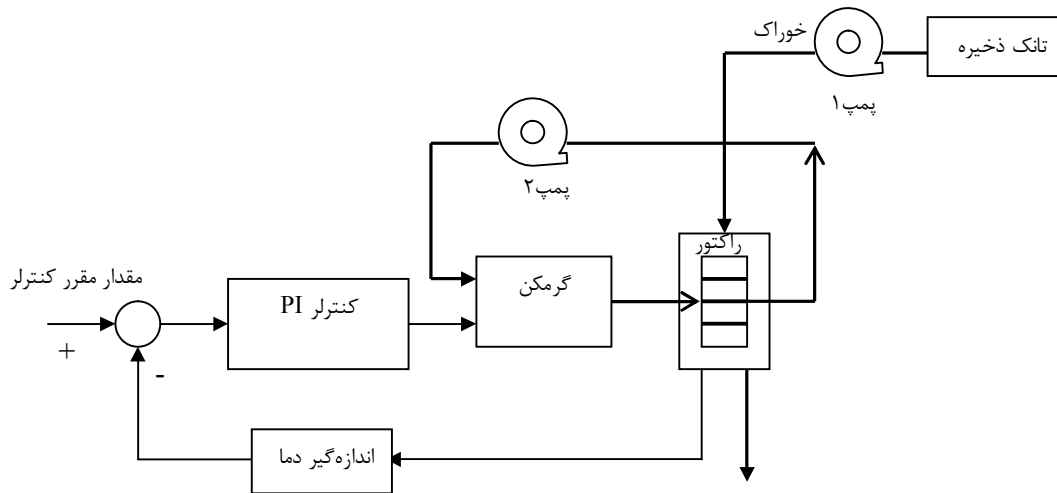
شکل ۲. شمای کلی سیستم عیب‌یاب فازی - ژنتیک

نمونه پژوهشی

به منظور بررسی عملکرد سیستم عیب‌یاب طراحی شده، به عیب‌یابی فرایند تبدیل هپتان به تولوئن پرداخته می‌شود. این فرایند طی یک واکنش گرماگیر و به صورت زیر انجام می‌پذیرد.



در شکل ۳، نمودار جریان این فرآیند نشان داده شده است. گرمای مورد نیاز واکنش از طریق جریان بخار داغ گردشی در پوستهٔ راکتور که به وسیله گرمکن برقی گرم می‌شود، تأمین می‌گردد. دمای محصول خروجی از راکتور به وسیلهٔ یک کنترلر PI، با تغییر توان مصرفی گرمکن برقی کنترل می‌شود. خوراک ورودی توسط پمپ، وارد بستر کاتالیزور موجود در راکتور می‌شود [۱۱].



شکل ۳. فرآیند تبدیل کاتالیزوری هپتان به تولوئن

در این بررسی فرض بر این است که سیستم کنترل فرآیند عاری از عیب بوده و اغتشاشات ورودی به فرایند را به خوبی دفع می‌کند؛ به طوری که فرایند از شرایط نرمال خیلی دور نمی‌شود. چهار عیب زیر ممکن است در فرآیند رخ دهد:

F_1 : ۰/۱ درصد کاهش در مقدار مقرر کنترلر

F_2 : ۲ درصد کاهش در ضریب کلی انتقال حرارت گرمکن

F_3 : ۱ درصد کاهش در غلظت خوراک

F_4 : ۱ درصد کاهش در دمای خوراک

متغیرهای قابل اندازه‌گیری در فرایند عبارتند از:

V_1 : دمای جریان خروجی از گرمکن برقی

V_2 : دمای جریان خروجی از راکتور

V_3 : غلظت تولوئن در جریان خروجی

برای پیاده سازی الگوریتم ژنتیک، ابتدا تعداد پارامترهای قابل تنظیم بهینه‌سازی، تعیین می‌شود. این تعداد را از رابطه زیر می‌توان بدست آورد.

$$N = 2 * n_F * n_V \quad (۶)$$

که عدد ۲، تعداد پارامترهای تابع گوسی در هر مجموعه فازی، n_F ، تعداد مجموعه فازی انتخاب شده برای هر متغیر، n_V ، تعداد متغیرهای قابل اندازه‌گیری و N ، تعداد پارامترهای قابل تنظیم بهینه‌سازی می‌باشد. جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها، به طور تصادفی انتخاب گردید. هم‌چنین جمعیت هر نسل، جدایی و جهش، به ترتیب ۵۰، ۰/۷ و ۰/۱ انتخاب شده است. سیستم عیب‌یاب ارائه شده در نرم افزار Matlab انجام شده است.

نتایج حاصل از سیستم عیب‌یاب

برخی از قوانین به‌کار رفته در سیستم عیب‌یاب فازی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. قوانین ارائه شده برای سیستم عیب‌یاب فازی فرایند تولید تولوئن.

نتیجه قانون (آن‌گاه)	مقدم قانون (اگر)
آن‌گاه F_1 ، NS است.	اگر V_1 ، NL و V_2 ، NS و V_3 ، NL باشد
آن‌گاه F_2 ، NL است.	اگر V_1 ، PL و V_2 ، Z و V_3 ، Z باشد
آن‌گاه F_3 ، NL است.	اگر V_1 ، NS و V_2 ، Z و V_3 ، NL باشد
آن‌گاه F_4 ، NS است.	اگر V_1 ، PS و V_2 ، Z و V_3 ، Z باشد
آن‌گاه F_2 ، PS است.	اگر V_1 ، NL و V_2 ، Z و V_3 ، Z باشد
آن‌گاه F_1 ، Z است.	اگر V_1 ، Z و V_2 ، Z و V_3 ، Z باشد
آن‌گاه F_1 ، PL است.	اگر V_1 ، PL و V_2 ، PS و V_3 ، PL باشد
آن‌گاه F_4 ، PL است.	اگر V_1 ، NS و V_2 ، Z و V_3 ، Z باشد
آن‌گاه F_2 ، NL است.	اگر V_1 ، PL و V_2 ، Z و V_3 ، Z باشد
آن‌گاه F_2 ، Z است.	اگر V_1 ، Z و V_2 ، Z و V_3 ، Z باشد
آن‌گاه F_3 ، NL است.	اگر V_1 ، NL و V_2 ، Z و V_3 ، NS باشد
آن‌گاه F_3 ، PS است.	اگر V_1 ، PS و V_2 ، Z و V_3 ، PS باشد
آن‌گاه F_4 ، Z است.	اگر V_1 ، Z و V_2 ، Z و V_3 ، Z باشد

نتایج عیب‌یابی عیوب منفرد، دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه با استفاده از سیستم عیب‌یاب فازی-ژنتیک در جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌گونه که در جدول ۲، مشاهده می‌شود، ضریب قطعیت در صورتی که عیب در فرایند وجود داشته باشد، بزرگ‌تر از ۰/۹ و در صورتی که عیب در فرایند نباشد، کوچک‌تر از ۰/۰۵ می‌باشد. این ضرایب نشان‌دهنده دقت و صحت سیستم عیب‌یاب طراحی شده می‌باشد. هم‌چنین تشخیص عیوب متعدد و هم‌زمان با سیستم طراحی شده انجام‌پذیر می‌باشد.



جدول ۲. نتایج سیستم عیب‌یابی فاز-ژنتیک برای فرایند تولید تولوئن از هپتان

نتایج حاصل از سیستم عیب‌یابی	ضرایب قطعیت	عیوب اعمال شده بر سیستم
نرمال	[۰ ۰/۰۳ ۰/۰۱ ۰]	نرمال
عیب ۱	[۰/۹۷ ۰/۰۲ ۰ ۰/۰۱]	عیب ۱
عیب ۲	[۰ ۰/۹۷ ۰/۰۴ ۰]	عیب ۲
عیب ۳	[۰/۰۲ ۰ ۰/۹۸ ۰]	عیب ۳
عیب ۴	[۰/۰۱ ۰/۰۴ ۰ ۰/۹۵]	عیب ۴
عیوب ۱ و ۲	[۰/۹۶ ۰/۹۳ ۰ ۰/۰۲]	عیوب ۱ و ۲
عیوب ۱ و ۳	[۰/۹۴ ۰/۰۱ ۰/۹۷ ۰/۰۴]	عیوب ۱ و ۳
عیوب ۱ و ۴	[۰/۹۴ ۰ ۰/۰۳ ۰/۹۸]	عیوب ۱ و ۴
عیوب ۲ و ۳	[۰ ۰/۹۵ ۰/۹۷ ۰]	عیوب ۲ و ۳
عیوب ۲ و ۴	[۰ ۰/۹۳ ۰ ۰/۹۷]	عیوب ۲ و ۴
عیوب ۳ و ۴	[۰ ۰/۰۱ ۰/۹۸ ۰/۹۲]	عیوب ۳ و ۴
عیوب ۱ و ۲ و ۳	[۰/۹۷ ۰/۹۴ ۰/۹۵ ۰/۰۲]	عیوب ۱ و ۲ و ۳
عیوب ۱ و ۲ و ۴	[۰/۹۵ ۰/۹۱ ۰ ۰/۹۲]	عیوب ۱ و ۲ و ۴
عیوب ۱ و ۳ و ۴	[۰/۰۱ ۰/۹۶ ۰/۹۲ ۰/۹۵]	عیوب ۱ و ۳ و ۴
عیوب ۱ و ۳ و ۴	[۰/۹۶ ۰/۰۵ ۰/۹۷ ۰/۹۸]	عیوب ۱ و ۳ و ۴
عیوب ۱ و ۲ و ۳ و ۴	[۰/۹۱ ۰/۹۳ ۰/۹۴ ۰/۹۴]	عیوب ۱ و ۲ و ۳ و ۴

نتیجه‌گیری

به منظور ایمنی و دستیابی به عملکرد بهینه فرایندی، شناسایی و تشخیص صحیح عیوب از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. یکی از روش‌های تشخیص عیب، استفاده از منطق فازی است، در این منطق، شیوه‌هایی را که برای طراحی و مدل‌سازی یک سیستم، نیازمند ریاضیات پیچیده و پیشرفته است، با استفاده از قوانین زبانی و دانش فرد خبره جایگزین می‌سازد. در این مقاله، تشخیص و شناسایی عیب در فرایند تبدیل هپتان به تولوئن با استفاده از منطق فازی انجام پذیرفت. هم‌چنین برای طراحی دقیق سیستم عیب‌یابی، از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه کردن پارامترهای تابع تعلق مجموعه‌های فازی استفاده شده است. سیستم عیب‌یابی پیشنهادی برای انواع ترکیب‌های عیوب (تک عیب تا چهار عیب هم‌زمان) به تشخیص صحیح می‌پردازد.

منابع

1. Tayyebi Sh., Boozarjomehry R.B. and Shahrokhi M., Neuromorphic Multiple-Fault Diagnosing System Based on Plant Dynamic Characteristics, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 52, 2013, pp 12927–12936.
2. Vedam H. and Venkatasubramanian V., Signed diagraph based multiple fault diagnosis, Computers & Chemical engineering, Vol. 21, 1997, pp S655-S660.
3. Sotomayor A.Z. and Odloak D., Observer-based fault diagnosis in chemical plants, Chemical Engineering Journal, Vol. 112, 2005, pp 93-108.



4. Hurdle E.E., Bartlett L.M. and Andrews J.D., Fault diagnostics of dynamic system operation using a fault tree based method, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, 2009, pp 1371-1380.
5. Tamura M. and Tsujita Sh., A study on the number of principal components and sensitivity of fault detection using PCA, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 31, 2006, pp 1035-1046 .
6. Shum S.K., Davis W.F. and Chndrasekaran B., An expert system approach diagnosis in chemical plants, *Computers & Chemical engineering*, Vol. 12, 1988, pp 27-36.
7. Dash S., Rengaswamy R. and Venkatasubramanian V., Fuzzy-logic based trend classification for fault diagnosis of chemical processes, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, 2003, pp 347-362.
8. White C. J. and Lakany H., A fuzzy inference system for fault detection and isolation: Application to a fluid system, *Expert Systems with Applications*, Vol. 35, 2008, pp 1021-1033.
9. Chang S.Y., Lin C. and Chang C.T., A fuzzy diagnosis approach using dynamic fault trees, *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, 2002, pp 2971-2985.
10. Tayyebi Sh., Shahrokhi M. and Bozorgmehry B.R., Fault Diagnosis in a Yeast Fermentation Bioreactor by Genetic Fuzzy System, *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering*, Vol. 30, 2010, pp 61-72.
11. Watanabe K., Hirota S. and Himmelblau D.M., Diagnosis of multiple simultaneous fault via hierarchical neural networks, *AIChE Journal*, Vol. 40, 1994, pp 839- 848.