

تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های دینامیک بر پایه درخت عیب زمانی پاندورا با استفاده از مجموعه فازی شهودی و استنباط خبره

مریم امینی مقدم

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد آمار دانشگاه صنعتی شاهرود، m.amini.stat1983@gmail.com

چکیده

درختان عیب زمانی (TFTs) پسوند درختان عیب کلاسیک بولی، می‌توانند رفتار شکست وابسته به زمان سیستم‌های دینامیک را مدل کنند. روش‌های مورد استفاده برای تحلیل کمی از TFTs شامل راه حل‌های جبری، شبکه‌های پتری (PN) و شبکه‌های بیزی (BN) است. در این روش‌ها معمولاً از داده‌های دقیق شکست اجزا برای محاسبه احتمال وقوع رویداد برتر TFT استفاده می‌شود. با این حال، به دست آوردن این داده‌های دقیق به دلیل اطلاعات نادرست و نادقیق در مورد اجزای یک سیستم می‌تواند مشکل ساز باشد. در این مقاله، چارچوبی را پیشنهاد می‌کنیم که نظریه مجموعه فازی شهودی و استنباط خبره را با ایجاد تجزیه و تحلیل کمی سیستم‌های دینامیکی با داده‌های نامشخص ترکیب می‌کند. برای محاسبه احتمال شکست رویدادهای اساسی از TFT به صورت اعداد فازی شهودی، نظرات کارشناسان در نظر گرفته شده است. پس از آن برای رویکرد جبری، عملگرهای فازی شهودی برای دروازه‌های منطق TFT، به منظور تعیین کمیت TFT تعریف می‌شوند. از سوی دیگر برای تعیین مقدار TFTs از طریق رویکردهای PN و BN، اعداد فازی شهودی غیرفازی شده که در این رویکردها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نتیجه می‌توان چارچوب را با کلیه روشهای تحلیل TFT موجود در دسترس استفاده کرد. اثربخشی چارچوب پیشنهادی از طریق کاربرد به یک سیستم عملی و از طریق مقایسه نتایج هر رویکرد نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل درخت عیب، تحلیل قابلیت اطمینان، مجموعه فازی، نظریه مجموعه فازی شهودی، استنباط خبره، درختان عیب زمانی پاندورا

مقدمه

حتی به عنوان تهدیدی شدید برای جامعه و محیط زیست تلقی شود. از این رو مصرف‌کنندگان و به طور کلی مردم جامعه انتظار دارند که محصول‌ها و سیستم‌ها، پایا، اطمینان بخش و ایمن باشند. قابلیت اعتماد اصطلاحی چتری است که شاخص‌های کارایی سیستم به اصطلاح RAMS شامل قابلیت اطمینان: تداوم خدمات صحیح، دسترس پذیری: آمادگی خدمات صحیح، نگهداشت پذیری و ضمانت: توانایی اصلاح و تعمیر و ایمنی: عدم وجود وقایعی که برای کاربر و محیط زیست فاجعه بار باشد، را پوشش می‌دهد. چنین معیارهایی برای تعیین اینکه آیا یک سیستم با الزامات مورد نیاز خود مطابقت دارد یا اینکه آیا معیارهای اضافی مورد نیاز است یا خیر، حیاتی هستند. تحلیل درخت

وابستگی ما به سیستم‌های حیاتی ایمنی پیچیده، قابلیت اعتماد به چنین سیستم‌هایی را به عنوان یک نگرانی اصلی برای جامعه مدرن تبدیل کرده است. در طول سال‌ها، ما کاربرد گسترده‌ای از سیستم‌های حیاتی ایمنی در انواع گسترده‌ای از صنایع از جمله خودرو، هوافضا، دریایی، پزشکی، هسته‌ای و انرژی شاهد بوده‌ایم. مسئولیت حقوقی طراح و سازنده و همچنین اطمینان و آسودگی خاطر مصرف‌کننده، از بدیهی‌ترین مسائل حقوقی دنیای امروز است. از کار افتادن محصول‌ها و سیستم‌ها موجب وقوع اختلال در سطوح مختلفی می‌شود و می‌تواند

اگر چه مدل‌های درخت عیب به خوبی ساختار بندی شده و به راحتی درک می‌شوند اما قادر به مدل‌سازی برخی از جنبه‌های رفتار سیستم به عنوان مثال اولویت‌ها و وابستگی‌های تصادفی و عملکردی بین رویدادها نیستند [17]. قابلیت مدل‌سازی درختان عیب کلاسیک از طریق چندین پسوند مانند درختان عیب دینامیک^۲ (DFTs) [18] و درختان عیب زمانی پاندورا (Pandora TFTs) [19] توسعه یافته است. به عنوان مثال در درختان عیب دینامیک، دروازه‌های دینامیک مانند دروازه وابستگی عملکردی (FDEP)، دروازه AND اولویت‌دار (PAND) و دروازه قطعات یدکی (SPARE) برای مدل‌سازی رفتار شکست دینامیک سیستم‌ها معرفی می‌شوند. درختان عیب دینامیک عمدتاً به صورت کمی تحلیل می‌شوند و برای تجزیه و تحلیل درختان عیب، به ویژه درختان عیب دینامیک، رویکردهای مختلف مانند جبری [20، 21]، مبتنی بر زنجیره مارکوف [22، 23]، تصادفی [24، 25]، رویکردهای مبتنی بر شبکه بی‌بیزی [26، 27] مبتنی بر نمودار تصمیم‌گیری باینری متوالی (SBDD) [28، 29] توسعه یافته است. اخیراً تعمیم شبکه‌های بی‌بیزی برای مدل‌سازی وابسته به زمان که به شبکه‌های دینامیک بی‌بیزی (DBNs) معروف است، پیشنهاد شده‌اند که یک چارچوب یکپارچه برای مدل‌سازی قابلیت اعتماد و تحلیل سیستم‌های پیچیده پویا ارائه می‌دهد. با این حال، رویکرد درخت عیب دینامیک دارای اشکالات دیگری نیز می‌باشد به طوریکه امکان تضاد یا افزونگی‌های ناشی از اطلاعات زمانی در درخت عیب را نشان نمی‌دهد و در مقابل به تحلیل کیفی زمانی و استاتیک به طور جداگانه می‌پردازد. بنابراین درخت عیب زمانی پاندورا بابت رفع چنین نقص‌هایی ایجاد شده است.

درخت عیب زمانی پاندورا یکی دیگر از پسوندهای درخت عیب دینامیک است. علاوه بر دروازه‌های بولی AND و OR، Pandora، TFTs از دروازه‌های زمانی برای به‌دست آوردن رفتار وابسته به زمان سیستم‌ها استفاده می‌کنند. یکی از مزیت‌های Pandora بر دیگر توسعه‌های دینامیک درختان عیب این است که می‌توان در مدل‌کردن آن را با طراحی و تجزیه و تحلیل فرایندها و ابزارهای آنالیز ترکیب کرد. این بدان معناست که Pandora TFTs می‌توانند از مدل‌های سیستم با استفاده از زبان‌های مدل‌سازی محبوب مانند Simulink Matlab [30]، Matlab EAST-AADL [31] یا AADL [32] سنتز شوند. با توجه به مزیت تحلیل قابلیت اعتماد مبتنی بر مدل از سیستم‌ها همانطور که در [33] توضیح داده شد و مزایای بالقوه Pandora در این زمینه، در این مقاله ما تنها بر روی این بسط ویژه تمرکز می‌کنیم.

عیب (FTA) یکی از تکنیک‌های بسیار قدرتمند و پرکاربرد در ارزیابی ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده و روشی بسیار برجسته برای تحلیل خطرات مربوط به ایمنی و دارایی‌های مهم اقتصادی مانند نیروگاه‌ها، هواپیماها، مراکز داده و فروشگاه‌های اینترنتی است. روش‌های FTA شامل طیف گسترده‌ای از تکنیک‌های تحلیل و مدل‌سازی است که توسط طیف گسترده‌ای از ابزارهای نرم افزاری پشتیبانی می‌شود. FTA نقش مهمی در صدور گواهینامه محصول و نشان دادن انطباق با الزامات قانونی دارد. درختان عیب یک استاندارد صنعتی، روش مدل‌سازی گرافیکی برای توصیف چگونگی انتشار شکست‌ها از طریق سیستم به عبارتی چگونگی تعامل اجزا برای ایجاد شکست‌های سرتاسری سیستم هستند [1]. این روش اولین بار توسط واتسون در سال ۱۹۶۱ در آزمایشگاه‌های تلفن گراهام بل و به درخواست نیروی هوایی آمریکا برای مطالعات قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌های موشکی بالستیک بین قاره‌ای طرح ریزی شد. در سال ۱۹۶۲، این روش در نیروی هوایی ایالات متحده بر روی سیستم کنترل پرتاب موشک اجرا شد. در سمپوزیوم ایمنی در سال ۱۹۶۵ با حمایت دانشگاه واشنگتن و شرکت بوئینگ مقالات متعددی ارائه شد که بیانگر مزایای تحلیل درختان عیب بود [2]. از آن زمان تاکنون، روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم پیچیده از طریق FTA گزارش شده است [3-6] و سهم قابل توجهی در پیشرفت FTA با ایجاد الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهایی برای حل درختان عیب [7] حاصل شده است که به طور گسترده برای ارزیابی ایمنی سیستم، تشخیص عیب و پیش‌بینی و نیز آنالیز قابلیت اطمینان سیستم‌های صنعتی، مانند راکتور هسته‌ای، هوافضا، انرژی الکتریکی، شیمی، مهندسی عمران، صنعت پتروشیمی، خطوط لوله و الکترونیک به‌کار می‌رود [8-12]. درختان عیب برای اهداف مختلف از جمله بررسی گزینه‌های طراحی [13]، نشان دادن انطباق [14] و تشخیص عیب [15] در تحلیل ریسک استفاده می‌شوند. مراحل تجزیه و تحلیل درخت عیب عبارتند از: تعریف رویداد برتر، شناخت از سیستم مورد مطالعه، ساخت درخت عیب، ارزیابی کیفی درخت عیب: یافتن مجموعه برش مینی‌مال، ارزیابی کمی درخت عیب: محاسبه احتمال رویداد برتر، شناسایی اجزا یا رویدادهای اساسی مهم، رتبه بندی رویدادهای اساسی بر اساس اهمیت و نهایتاً اقدامات پیشگیرانه لازم برای اصلاح و بهبود سیستم ارائه می‌شود. قوانین مفیدی برای ساخت ساختار درخت عیب برای اولین بار توسط دیوید حاصل ۲ تهیه و توسط "کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای ایالات متحده" در سال ۱۹۸۱ منتشر شده است [16].

^۱Priority-AND Gate^۲Spare Gate^۳Sequential Binary Decision Diagram^۴Dynamic Bayesian Networks^۵Fault Tree Analysis^۶Dynamic Fault Trees^۷Pandora Temporal Fault Trees^۸Functional Dependency Gate

علاوه بر عملکرد عضویت، از مفهوم عملکرد غیر عضویت استفاده می‌کند به گونه‌ای که جمع آن‌ها کمتر از 1 [45] است. به نقل از بیواس [46] در بسیاری از شرایطی که تعیین درجه عضویت یک شی با قطعیت دشوار است، استفاده از IFS نسبت به عدم قطعیت ترجیح داده می‌شود؛ علاوه بر آن در [47] اشاره شد که مفهوم مجموعه مبهم با مفهوم IFS منطبق است. در نتیجه امید این است که IFS می‌تواند برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مرتبط با هر فرآیند و یا فعالیت‌هایی که شامل خبرگی و دانش انسانی است، استفاده شود. در گذشته، از مفهوم IFS در کاربردهای مهندسی قابلیت اطمینان استفاده شده است. به عنوان مثال، شو و همکاران [48] روش FTA را با استفاده از IFS معرفی کردند. محققان دیگر [49-56] همچنین رویکردهای FTA را با استفاده از نظریه IFS توسعه داده‌اند.

اگرچه کاربردهای بالقوه نظریه مجموعه فازی شهودی در FTA استاتیک کلاسیک در گذشته به عنوان بهترین دانش نویسندگان بررسی شده است، هنوز مورد بررسی قرار نگرفته است که چگونه IFS می‌تواند با پسوندهای پویا از درختان عیب مورد استفاده قرار گیرد. در [57-58] [17]، نظریه مجموعه فازی کلاسیک برای پرداختن به مساله داده‌های شکست نادقیق در طول تحلیل کمی TFTs استفاده شده است. این رویکردها را تنها زمانی می‌توان اعمال کرد که اطلاعات کافی در دسترس باشد تا احتمالات شکست رویدادهای اساسی با استفاده از مجموعه‌های فازی کلاسیک تعریف شود. در نتیجه هنگام استفاده از این رویکردها، نمی‌توان سناریوهایی را مدل‌سازی کرد که در آن دانش دقیق از ابهام داده‌های کمی با سطح خاصی از اطمینان قابل بیان نباشد. با توجه به قابلیت مدل‌سازی عدم قطعیت افزوده ارایه شده توسط نظریه IFS در نظریه مجموعه فازی کلاسیک، ادغام این تکنیک در فرآیند کمی‌سازی TFT، احتمالات زیادی را باز خواهد کرد. در این مقاله، چارچوبی برای ادغام نظریه IFS با استنباط خبره ارائه می‌کنیم تا تحلیل قابلیت اطمینان دینامیکی سیستم‌ها را از طریق TFTs در مواقعی که داده‌های شکست دقیق اجزای سیستم در دسترس نیستند را قادر سازد.

تحلیل درخت عیب فازی شهودی زمانی پاندورا

نظریه مجموعه فازی شهودی

ابتدا تعریف مجموعه‌های فازی را می‌آوریم که برای اولین بار توسط لطفی عسگرزاده در مقاله‌ای در سال ۱۹۶۵ [38] مطرح گردید، هدف او ایجاد مدلی ساده‌تر برای سیستم‌های پیچیده بود. مجموعه مرجع X را در نظر بگیرید مجموعه فازی A روی X بوسیله تابع عضویت $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ تعریف می‌شود که به هر عضو $x \in$

بنابراین، اگر چه نویسندگان از پیشرفت‌های اخیر دیگر با پسوندهای پویا دیگر از درختان عیب اطلاع دارند، به اختصار، سایر تحولات مربوط به DFTs در این مقاله حذف شده‌اند.

تجزیه کیفی Pandora TFTs اجازه تعیین توالی‌های برش مینیمال (MCSQs) را می‌دهد. MCSQs کوچک‌ترین توالی از رویدادهای اساسی (BEs) هستند که می‌تواند منجر به شکست سیستم شود. روش شناسی‌ها در گذشته برای تحلیل کمی TFTs ارائه شده است. این روش‌ها شامل راه‌حل جبری [34]، رویکرد مبتنی بر شبکه بی‌زی [35] و رویکرد مبتنی بر شبکه پتری [36، 37] است. تمام این رویکردها از احتمالات / نرخ‌های شکست دقیق اجزای سیستم برای اهداف کمی‌سازی استفاده می‌کنند. به طور کلی، جمع‌آوری احتمالات یا نرخ‌های دقیق شکست برای تمام اجزای سیستم‌های پیچیده و بزرگ مشکل ساز است، که می‌تواند انجام تجزیه و تحلیل کمی را دشوار کند. نظریه مجموعه فازی [38] برای رسیدگی به چنین سناریوهای نامطمئن با نسبت دادن درجه‌ای که یک شی معین به یک مجموعه تعلق دارد، توسعه یافته است. به طور گسترده‌ای برای تعیین کمیت عدم قطعیت در کاربردهای مهندسی قابلیت اطمینان استفاده شده است. اولین کاربرد نظریه مجموعه فازی با FTA می‌تواند در [39] یافت شود. در [40] یک بررسی جامع از مفهوم نظریه مجموعه فازی و کاربردهای آن‌ها ارایه شد و مروری بر کاربردهای نظریه مجموعه فازی در تحلیل ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم در [41] ارائه شد. در [42] نظریه مجموعه فازی با یک مدل محاسباتی تصادفی برای تحلیل سیستم‌های فازی استفاده شده است. برای بدست آوردن داده‌های شکست نامشخص، قضاوت خبره در ارتباط با نظریه مجموعه‌های فازی مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال، لین و وانگ [43] استنباط خبره با نظریه مجموعه‌های فازی را برای تجزیه و تحلیل درخت عیب با داده‌های نامشخص ترکیب کردند.

در نظریه مجموعه‌ها، مفهوم تابع عضویت برای تعریف درجه عضویت یک شی خاص به یک مجموعه استفاده می‌شود، یعنی، چه قدر یک شی به یک مجموعه تعلق دارد. در بسیاری از موارد ممکن است بتوان این درجه عضویت را با قطعیت تعریف کرد. نظریه مجموعه‌های فازی کلاسیک قادر به ترکیب عدم قطعیت یا تردید در توابع عضویت نیست. به عنوان یک راه حل بالقوه برای این مشکل، آتاناسوف [44] مفهوم مجموعه‌های فازی شهودی (IFS) را پیشنهاد کرد. به عنوان بسط نظریه مجموعه‌های فازی کلاسیک، IFS در تعریف یک کمیت غیر دقیق با استفاده از مجموعه‌های فازی مفید است که در آن مجموعه‌های فازی کلاسیک به دلیل ناکافی بودن اطلاعات موجود نمی‌توانند کمیت را تعریف کنند. بر خلاف مجموعه فازی، IFS

[†]Intuitionistic Fuzzy Sets

[‡]Minimal Cut Sequences

[§]Basic Events

دروازه‌های منطقی را می‌توان در [37] یافت. در یک عبارت منطقی، دروازه PND، POR و SAND به ترتیب با نماد “<”، “>” و “&” نشان داده شده‌اند. دروازه AND و OR به ترتیب به صورت “∧” و “∨” نمایش داده می‌شوند. Pandora TFTs می‌توانند از طریق تجزیه و تحلیل مبتنی بر مدل سیستم‌ها ایجاد شوند. به عنوان مثال، با استفاده از HiP-HOPS [61]، تکنیک تجزیه و تحلیل ایمنی مبتنی بر مدل Pandora TFTs می‌توانند به صورت نیمه خودکار از مدل‌های سیستم تولید شوند [62]. زمانی که یک TFT ساخته شود، هم تحلیل کمی و هم کیفی می‌تواند روی آن انجام شود. با تجزیه و تحلیل کیفی، TFT با به‌دست آوردن MCSQs به حداقل می‌رسد. برای تجزیه و تحلیل کمی از TFTs، هر دو روش‌های مبتنی بر تحلیل جبری [34] و مبتنی بر فضای حالت شامل شبکه‌های بیزی و شبکه‌های پتری [35]، [36] توسعه یافته‌اند. برای توضیح مفصل تحلیل درختان عیب زمانی مبتنی بر فضای حالت، خوانندگان علاقمند به [37] ارجاع داده می‌شوند. با استفاده از راه‌حل‌های تحلیلی به محاسبه احتمال شکست برای دروازه‌های زمانی پاندورا می‌پردازیم.



شکل ۲: دروازه‌های زمانی پاندورا

۳.۲. تحلیل جبری برای درختان عیب زمانی

در یک راه‌حل جبری، فرمول‌های ریاضی برای تعیین کمیت دروازه‌های زمانی ارائه شده است. اگر نرخ‌های شکست N رویداد $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ به یک دروازه PAND به صورت $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N-1}, \lambda_N\}$ تعریف شده باشد آنگاه احتمال وقوع دروازه PAND در زمان t تعیین شده به صورت [21]:

$$P_r\{X_1 < X_2 < \dots < X_{N-1} < X_N\}(t) = \prod_{i=1}^N \lambda_i \sum_{k=0}^N \left[\frac{e^{(u_k t)}}{\prod_{j=0, j \neq k}^N (u_k - u_j)} \right]$$

که در آن $u_m = -\sum_{j=1}^m \lambda_j$ و $u_0 = 0$ ، $m > 0$ فرمول زیر را می‌توان برای کمی‌سازی یک دروازه POR با N ورودی استفاده کرد [34].

$$P_r\{X_1 > X_2 > \dots > X_{N-1} > X_N\}(t) = \frac{\lambda_1 (1 - (e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t}))}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$$

دروازه‌های AND و OR بولی را می‌توان با استفاده از معادلات زیر تعیین کرد.

$$P_r\{X_1 \wedge X_2 \wedge \dots \wedge X_{N-1} \wedge X_N\}(t) = \prod_{i=1}^N P_r\{X_i\}(t)$$

X یک عدد حقیقی $\mu_{\bar{A}}(x)$ از $[0,1]$ اختصاص می‌دهد. مقادیر $\mu_{\bar{A}}(x)$ درجه عضویت x را در مجموعه A نشان می‌دهند. بنابراین هر زیرمجموعه فازی A از X به صورت $\bar{A} = \{x \in X \mid \mu_{\bar{A}}(x) > 0\}$ قابل نمایش است.

اکنون به تعریف تعمیم یافته مجموعه‌های فازی که توسط آتاناسوف ارائه شده می‌پردازیم. آتاناسوف [45] مفهوم مجموعه‌های فازی را به مجموعه فازی شهودی با معرفی میزان عدم عضویت $v_{\bar{A}}(x)$ نشان‌دهنده شواهدی علیه $x \in X$ را همراه با میزان عضویت $\mu_{\bar{A}}(x)$ نشان‌دهنده شواهدی برای $x \in X$ تعمیم داد و بدین ترتیب جنبه‌ای از عدم قطعیت را می‌پذیرد. به نظر می‌رسد این ایده در مدل‌سازی بسیاری از سناریوهای عملی موثر باشد.

تعریف ۱، ۲. اگر X یک فضای مرجع باشد آنگاه یک مجموعه فازی شهودی A به صورت زیر نمایش داده می‌شود

$$\bar{A} = \{x \in X \mid \langle x, \mu_{\bar{A}}(x), v_{\bar{A}}(x) \rangle\}$$

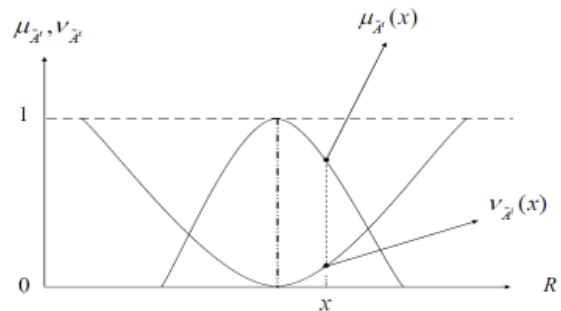
که در آن $\mu_{\bar{A}}: X \rightarrow [0,1]$ تابع عضویت و $v_{\bar{A}}: X \rightarrow [0,1]$ تابع عدم عضویت است. این توابع شرایط زیر را محقق می‌کنند [59].

$$0 \leq \mu_{\bar{A}}(x) + v_{\bar{A}}(x) \leq 1, \forall x \in X$$

برای هر مقدار $x \in X$ ، مقادیر $\mu_{\bar{A}}(x)$ و $v_{\bar{A}}(x)$ به ترتیب درجات عضویت و عدم عضویت عناصر $x \in X$ برای مجموعه فازی شهودی $A \subseteq X$ را نشان می‌دهند. به علاوه شاخص فازی شهودی (درجه عدم قطعیت یا سطح تردید) x در A به صورت زیر تعریف می‌شود [59].

$$\pi_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_{\bar{A}}(x) - v_{\bar{A}}(x)$$

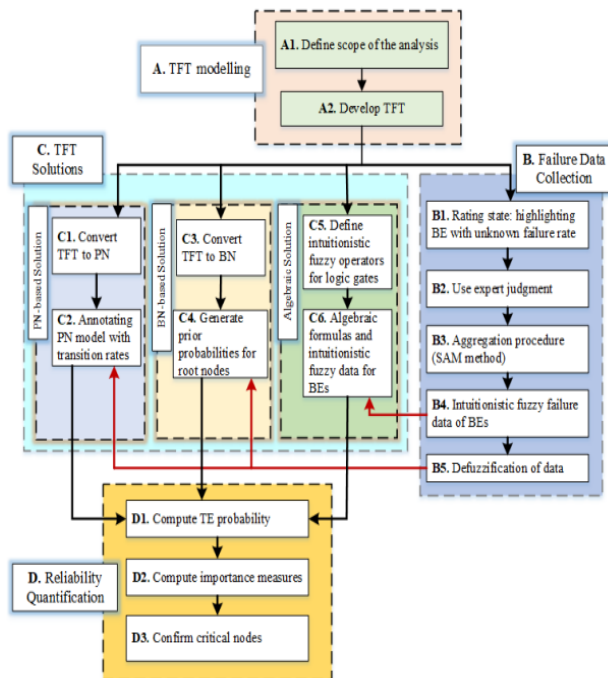
اگر $\pi_{\bar{A}}(x) = 0$ ، $\forall x \in X$ آنگاه مجموعه فازی شهودی به مجموعه فازی نرمال تقلیل می‌یابد. توصیف کلی یک مجموعه فازی شهودی \bar{A} از مجموعه مرجع X در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: نمایش مجموعه فازی شهودی \bar{A}

تحلیل درخت عیب زمانی پاندورا

علاوه بر دروازه‌های بولی FTs کلاسیک، Pandora TFT از سه دروازه زمانی AND اولویت‌دار (PAND)، OR اولویت‌دار (POR)، AND هم‌زمان (SAND) برای مدل‌سازی رفتار زمانی سیستم‌ها استفاده می‌کند. نمایش گرافیکی دروازه‌های منطقی بکاررفته در Pandora در شکل ۲ نشان داده شده است. شرح مفصلي از رفتار این



شکل 3: چارچوب پیشنهادی

مدل سازی TFT

این مرحله بر مدل سازی رفتار شکست دینامیکی سیستم تحت مطالعه با استفاده از درختان عیب زمانی تمرکز دارد. برای انجام این کار، گام اول تعریف حوزه تحلیل است. سپس تعیین رویدادهای ضروری منجر به رویداد برتر و در نهایت، سطح جزئیاتی که قرار است در ریشه پوشش داده شود، تحلیل علل شکست سیستم تعریف می شود. هنگامی که همه این موارد تعریف شوند، رفتار شکست سیستم در نتیجه مانند TFT مدل سازی می شود. فرآیند توسعه TFT، رویکرد بالا به پایین را دنبال می کند. در ابتدا، یک رویداد برتر (وضعیت شکست سیستم) شناسایی می شود و فرآیند توسعه TFT با این رویداد برتر آغاز می شود. رویداد برتر به تعدادی از وقایع فوری تجزیه می شود که می تواند سبب رویداد برتر شود. هر یک از این رویدادها با استفاده از دروازه های بولی و پویا مدل سازی می شوند تا روابط ترکیبی و زمانی بین رویدادها را منعکس کنند. رویدادهای میانی بیشتر تجزیه می شوند تا اینکه رویدادهای اساسی به دست آید.

جمع آوری داده های شکست

برای تعیین کمیت TFT که در مرحله قبل ایجاد شد، باید داده های شکست را برای BEs به دست آوریم. در این مقاله، دانش چند متخصص برای به دست آوردن امکان شکست BEs با داده های نامعلوم استفاده می شود. متخصصان می توانند از زمینه های مختلف باشند و

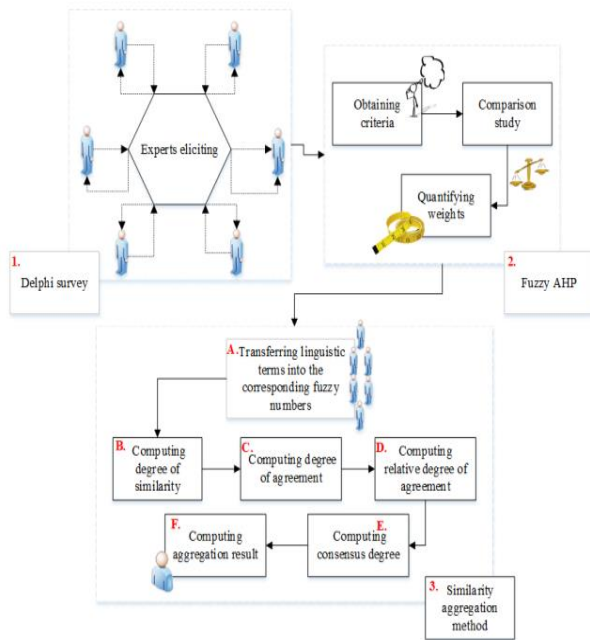
$$P_r\{X_1 \vee X_2 \vee \dots \vee X_{N-1} \vee X_N\}(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_r\{X_i\}(t))$$

که در آن $P_r\{X_i\}(t)$ احتمال رویداد X_i در زمان t است. توجه داشته باشید که فرمول های فوق را تنها در صورتی می توان برای تعیین کمیت TFTs استفاده کرد که نرخ شکست (خرابی) دقیق BEs در دسترس باشد. برای پذیرفتن استفاده از نرخ های شکست مبهم/نادقیق در فرآیند کمی سازی، یک روش در [59] برای تحلیل درخت عیب زمانی فازی پیشنهاد شده است. در این روش، نرخ خرابی BEs به صورت اعداد فازی در نظر گرفته شده و به صورت اعداد فازی مثلی نمایش داده می شود. فرمول هایی برای تعیین کمیت دروازه های منطقی با داده های فازی تعریف شدند.

روش شناسی

در این مقاله یک چارچوب برای FTA زمانی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از نظریه مجموعه فازی شهودی ارائه شده است که در آن داده های شکست مولفه های سیستم موجود نیستند یا ناکافی هستند. این چارچوب، ترکیبی از نظریه IFS و استنباط خبره برای تسهیل جمع آوری داده های شکست نادقیق است. عملگرهای فازی شهودی برای کمی سازی دروازه های منطق در یک درخت عیب زمانی تعریف می شوند که داده های شکست اجزای سیستم با TIFNs نمایش داده می شوند. تفاوت اصلی کاربرد IFSs مافوق مجموعه های فازی کلاسیک است به طوری که IFSs شواهد مثبت و منفی برای عضویت یک عنصر در مجموعه را تفکیک می کند. چارچوب پیشنهادی برای ادغام نظریه IFS و استنباط متخصص در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم ها از طریق تجزیه و تحلیل TFT در شکل 3 نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان با استفاده از این چارچوب به چهار مرحله نیاز دارد:

صحت کردند. در این مقاله از تعمیم SAM^۳ برای جمع آوری IFNs استفاده شده است.



شکل ۴: مراحل استفاده از سیستم قضاوت خبره

می‌توانند سطوح مختلف تخصص و تجربه کاری داشته باشند. به همین دلیل، وزن‌دهی متخصصان متفاوت است؛ بنابراین برای کاربرد عملی، استخدام یک گروه ناهمگن از متخصصان واقعی‌تر است [63، 64]. چندین معیار برای تعیین وزن یک متخصص، به عنوان مثال، سابقه کاری، صلاحیت آموزشی و اطمینان از نظرات مد نظر قرار گرفتند. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، استفاده درست از سیستم قضاوت خبره شامل سه مرحله اصلی است:

فرایند استخراج نظرات

هنگامی که جمع‌آوری داده‌های شکست دشوار یا بسیار پرهزینه است، استنباط دانش خبره می‌تواند به عنوان ابزار جمع‌آوری داده‌ها در نظر گرفته شود [65]. پنج اصل مورد توجه کوک [66] شامل تجدید پذیری، پاسخگویی، کنترل تجربی، بی‌طرفی، و انصاف، نشان‌دهنده تلاشی برای تدوین یک راهنمای یکنواختی برای استفاده از نظرات متخصصان در زمینه علوم سیستم خبره است. در این رابطه، روش دلفی را می‌توان برای به‌دست آوردن معتبرترین نظر گروهی از متخصصان استفاده کرد [67].

فرایند فازی‌زدایی

روش فازی‌سازی منجر به یک نتیجه قابل اندازه‌گیری در نظریه فازی می‌شود. برای رویکردهای کمی TFT مبتنی بر مقدار دقیق مانند PNs و BNs، ما به نرخ‌های شکست دقیق و/یا احتمالات BE نیاز داریم. بنابراین، ما باید احتمال شکست IF یک BE را به یک مقدار دقیق غیرفازی کنیم. اگر احتمال شکست IF یک BE با یک IFN مثلی به صورت $\tilde{A} = \{a, b, c; \hat{a}, \hat{b}, \hat{c}\}$ نمایش داده شود، سپس می‌توان آن را با استفاده از فرمول زیر برای به‌دست آوردن یک مقدار دقیق غیرفازی کرد.

$$X = \frac{1}{3} \left[\frac{(\hat{c} - \hat{a})(b - 2\hat{c} - 2\hat{a}) + (c - a)(a + b + c) + 3(\hat{c}^2 - \hat{a}^2)}{\hat{c} - \hat{a} + c - a} \right]$$

تبدیل امکان شکست دقیق رویدادهای اساسی به احتمال شکست

کمی‌سازی TFT بر اساس نرخ شکست/احتمال BEs انجام می‌شود. بنابراین، امکانات شکست رویدادهای اساسی به‌دست‌آمده از استخراج متخصص باید به احتمال شکست مربوطه تبدیل شود. این تبدیل را می‌توان با استفاده از فرمول پیشنهاد شده زیر توسط اونیسوا [75] انجام داد.

وزن‌دهی تخصصی

به‌دست آوردن وزن‌های واقع بینانه برای کارشناسان شاغل دارای اهمیت است. قضاوت کارشناسان، به ویژه در بیان نظرات خود در مورد سیستم بزرگ و پیچیده، مشمول سوگیری است [68]. در میان بسیاری از روش‌های موجود، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) [69] روشی رایج در تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) است. AHP کلاسیک توانایی محدودی برای مدل‌کردن تفکر انسانی و فرایند شناختی دارد، به‌خصوص برای شرایطی که برای متخصصان دشوار است تا مقادیر دقیق را برآورد کنند. برای رسیدگی به این موارد، یک روش جدید به نام فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی^۲ (FAHP) [70، 71] توسعه یافته است. در میان انواع مختلف موجود در FAHP، روش‌های پیشنهاد شده توسط باکلی [72] و چانگ [73] مهم‌ترین آن‌ها هستند.

فرایند تجمیع

تجمیع نظرات چند کارشناس لازم است تا به یک اجماع نظر رسید. روش‌های مختلف برای تجمیع از قبیل میانگین حسابی و روش تجمیع شباهت را می‌توان در این زمینه مورد استفاده قرار داد. یزدی و زارعی [74] در مورد مزایا و برتری چنین روش‌های رایج در FTA مرسوم فازی

^۳Similarity Aggregation Method

^۱Multi Criteria Decision Making

^۲Fuzzy Analytical Hierarchy Process

شده باشد، آنگاه احتمال شکست فازی شهودی دروازه PAND با این رویدادها را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$P_{IF-PAND}(t) = PAND_{IF}\{\lambda_1, \lambda_1, \dots, \lambda_N\} \\ = \{l, m, n; l', m, n'\}$$

که در آن

$$l = \prod_{i=1}^N l_i \sum_{k=0}^N \left[\frac{e^{(u_k t)}}{\prod_{j \neq k}^N (u_k - u_j)} \right]; u_0 = 0, u_k \\ = - \sum_{i=1}^k l_i \text{ for } k > 0$$

$$m = \prod_{i=1}^N m_i \sum_{k=0}^N \left[\frac{e^{(u_k t)}}{\prod_{j \neq k}^N (u_k - u_j)} \right]; u_0 = 0, u_k \\ = - \sum_{i=1}^k m_i \text{ for } k > 0$$

$$n = \prod_{i=1}^N n_i \sum_{k=0}^N \left[\frac{e^{(u_k t)}}{\prod_{j \neq k}^N (u_k - u_j)} \right]; u_0 = 0, u_k \\ = - \sum_{i=1}^k n_i \text{ for } k > 0$$

$$l' = \prod_{i=1}^N l'_i \sum_{k=0}^N \left[\frac{e^{(u_k t)}}{\prod_{j \neq k}^N (u_k - u_j)} \right]; u_0 = 0, u_k \\ = - \sum_{i=1}^k l'_i \text{ for } k > 0$$

$$n' = \prod_{i=1}^N n'_i \sum_{k=0}^N \left[\frac{e^{(u_k t)}}{\prod_{j \neq k}^N (u_k - u_j)} \right]; u_0 = 0, u_k \\ = - \sum_{i=1}^k n'_i \text{ for } k > 0$$

احتمال فازی شهودی دروازه POR

اگر N رویداد ورودی $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ به ترتیب با نرخ‌های شکست فازی شهودی $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ موجود باشد و λ_i ، $i = 1, 2, 3, \dots, N$ با یک IFN مثلثی $\{l_i, m_i, n_i; l'_i, m_i, n'_i\}$ نشان داده شده باشد، آنگاه احتمال شکست فازی شهودی دروازه POR با این رویدادها را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$P_{IF-POR}(t) = POR_{IF}\{\lambda_1, \lambda_1, \dots, \lambda_N\} = \{l, m, n; l', m, n'\}$$

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^K}, & CFP \neq 0 \\ 0, & CFP = 0 \end{cases}$$

که در آن FP احتمال شکست و CFP امکان شکست دقیق است و

$$K = \left(\frac{1 - CFP}{CFP} \right)^{\frac{1}{3}} \times 2/301$$

راه حل جبری برای درختان عیب فازی شهودی زمانی

برای استفاده از IFNs در تعیین کمیت TFTs، عملگرهای فازی شهودی برای دروازه های منطق باید تعریف شوند. به منظور استفاده از نرخ ها یا احتمالات شکست فازی در فرآیند کمی سازی، عملگرهایی برای تمام دروازه های منطق فرمول بندی شده اند که در زیر توضیح داده ایم.

احتمال فازی شهودی دروازه AND

اگر احتمال شکست یک رویداد X_i ، $i = 1, 2, 3, \dots, N$ در زمان t توسط عدد فازی شهودی $\tilde{P}_i = \{a_i, b_i, c_i; a'_i, b_i, c'_i\}$ مشخص شود. احتمال شکست فازی شهودی یک دروازه AND با N رویدادهای ورودی $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$P_{IF-AND}(t) = AND_{IF}\{P_1, P_2, \dots, P_N\} \\ = \left(\prod_{i=1}^N a_i(t), \prod_{i=1}^N b_i(t), \prod_{i=1}^N c_i(t); \prod_{i=1}^N a'_i(t), \prod_{i=1}^N b_i(t), \prod_{i=1}^N c'_i(t) \right)$$

احتمال فازی شهودی دروازه OR

احتمال شکست فازی شهودی یک دروازه OR با N رویدادهای ورودی $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$P_{IF-OR}(t) = OR_{IF}\{P_1, P_2, \dots, P_N\} \\ = \left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - a_i(t)), 1 - \prod_{i=1}^N (1 - b_i(t)), 1 - \prod_{i=1}^N (1 - c_i(t)); 1 - \prod_{i=1}^N (1 - a'_i(t)), 1 - \prod_{i=1}^N (1 - b_i(t)), 1 - \prod_{i=1}^N (1 - c'_i(t)) \right)$$

احتمال فازی شهودی دروازه PAND

اگر N رویداد ورودی $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ به ترتیب با نرخ‌های شکست فازی شهودی $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ موجود باشد و λ_i ، $i = 1, 2, 3, \dots, N$ با یک IFN مثلثی $\{l_i, m_i, n_i; l'_i, m_i, n'_i\}$ نشان داده

که در شکل مشاهده می‌شود، TFT شامل هفت رویداد اساسی است (که به صورت دایره نشان داده می‌شوند): $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$. این رویدادهای اساسی نشان‌دهنده خرابی اجزای مختلف سیستم سوخت هستند. TFT در شکل ۶ برای به‌دست آوردن شش توالی برش مینیمال تجزیه و تحلیل شده است. به منظور مقایسه، احتمال TE برای ۱۰۰۰۰ ساعت با استفاده از رویکردهای جبری و رویکردهای مبتنی بر شبکه پتری و شبکه بیزی محاسبه می‌شود. با استفاده از احتمالات فازی شهودی BES و عملگرهای فازی شهودی تعریف شده برای دروازه‌های TFT، احتمالات شکست شهودی توالی‌های برش مینیمال به‌دست آمده و در جدول ۱ نشان داده شده است. با استفاده از احتمال فازی شهودی دروازه OR و داده‌های فازی شهودی جدول ۱، احتمال فازی شهودی رویداد برتر درخت عیب زمانی شکل ۶ محاسبه می‌شود. با استفاده از روش‌های فازی‌زدایی، امکان شکست فازی شهودی رویداد برتر به مقدار دقیق تبدیل می‌شود. به‌علاوه از مقادیر دقیق جدول ۱ و فرمول‌های ارائه شده در بخش تحلیل جبری برای درختان عیب زمانی، برای محاسبه احتمال TE استفاده شده است. برای مقایسه نتایج برآورد شده توسط رویکرد جبری مبتنی بر اعداد فازی شهودی، درخت عیب زمانی با استفاده از رویکردهای مبتنی بر شبکه بیزی و شبکه پتری کمیت‌سازی شد. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب مدل‌های شبکه بیزی و شبکه پتری از درخت عیب زمانی شکل ۶ را نشان می‌دهند. بنابراین، برای مقایسه نتایج برآورد شده توسط رویکردهای فازی با نتایج برآورد شده توسط رویکردهای مبتنی بر مقدار دقیق، احتمالات شکست فازی شهودی و احتمالات شکست فازی کلاسیک را فازی‌زدایی کردیم. مقایسه نتایج رویکردهای مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. از جدول ۲ می‌توان دریافت که احتمالات TE برآورد شده توسط رویکردهای مختلف به یکدیگر نزدیک هستند. اگرچه تفاوت‌های کوچکی بین احتمالات TE برآورد شده توسط رویکردهای مختلف وجود دارد، نکته مهمی که باید به آن توجه کرد این است که استفاده از نظریه مجموعه‌های فازی شهودی با استنباط متخصص، تحلیل را در مواردی که اطلاعات موجود در مورد اجزای سیستم برای تعریف نرخ شکست آنها با استفاده از مجموعه‌های فازی کلاسیک کافی نیست، امکان‌پذیر می‌سازد.

$$l = \frac{l_1 \left(1 - \left(e^{-\left(\sum_{i=1}^N l_i t \right)} \right) \right)}{\sum_{i=1}^N l_i}, m$$

$$= \frac{m_1 \left(1 - \left(e^{-\left(\sum_{i=1}^N m_i t \right)} \right) \right)}{\sum_{i=1}^N m_i}, n$$

$$= \frac{n_1 \left(1 - \left(e^{-\left(\sum_{i=1}^N n_i t \right)} \right) \right)}{\sum_{i=1}^N n_i}$$

$$m' = \frac{m'_1 \left(1 - \left(e^{-\left(\sum_{i=1}^N m'_i t \right)} \right) \right)}{\sum_{i=1}^N m'_i}, n'$$

$$= \frac{n'_1 \left(1 - \left(e^{-\left(\sum_{i=1}^N n'_i t \right)} \right) \right)}{\sum_{i=1}^N n'_i}$$

تعیین کمیت قابلیت اطمینان و اهمیت فازی شهودی

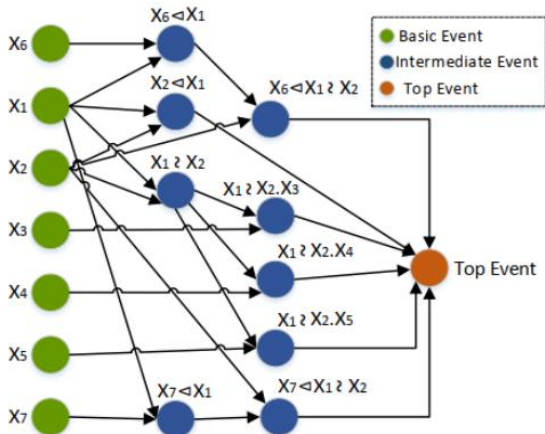
در مرحله پایانی چارچوب پیشنهادی، احتمال وقوع TE از TFT محاسبه می‌شود و میزان بحرانی بودن BES مشخص می‌شود. معیارهای اهمیت را می‌توان برای شناسایی مولفه‌های کلیدی مورد استفاده قرار داد. سهم مختلف BES در احتمال وقوع TE را تعیین می‌کند، یعنی، می‌تواند تغییر در احتمال TE به دلیل تغییر در احتمال BES را تعیین کند. نتایج یک آنالیز حساسیت می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان برای بهبود قابلیت اعتماد سیستم‌ها با اتخاذ اقدامات ضروری مانند تعمیر و نگهداری، برنامه ریزی و ارتقا کمک کند. تکنیک‌های آنالیز حساسیت مختلف مانند اندازه‌گیری اهمیت بیرنوم (BIM) و ارزش کاهش ریسک (RRW) به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در اینجا، برای رتبه بندی BES در TFT فازی شهودی، تعریف معیار اهمیت فازی پیشنهادی در [58] تعمیم داده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

اگر $\bar{P}_{T_{i=1}} =$ و $\bar{P}_{T_{i=0}} = \{a_2, b_2, c_2; a'_2, b_2, c'_2\}$ و $\{a_1, b_1, c_1; a'_1, b_1, c'_1\}$ دو عدد فازی شهودی هستند که نشان‌دهنده امکان شکست فازی شهودی رویداد برتر با رویداد اساسی i به ترتیب کاملاً دسترس‌ناپذیر و دسترس‌پذیر هستند، سپس معیار اهمیت فازی شهودی (IFIM) برای i - امین رویداد اساسی به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

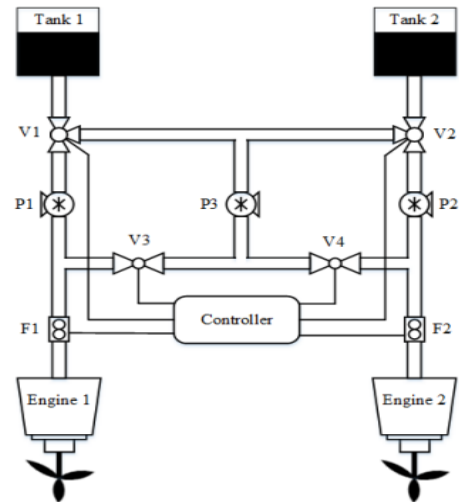
$$IFIM(BE_i) = \frac{(a'_1 - a'_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + 2(b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2 + (c'_1 - c'_2)^2}{2}$$

مطالعه موردی

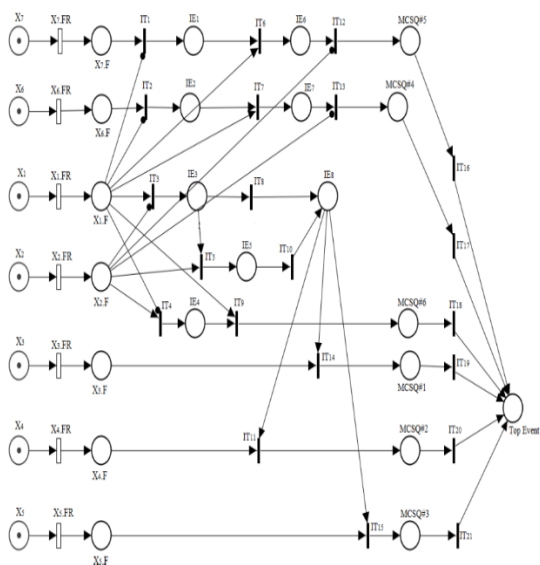
کارایی چارچوب پیشنهادی از طریق درخت عیب زمانی یک سیستم توزیع سوخت در شکل ۵ نمایش داده شده است [76]. درخت عیب زمانی در شکل ۶ دلایل عدم تامین سوخت به موتور را که به عنوان رویداد برتر سیستم شناسایی شده است را نشان می‌دهد. همانطور



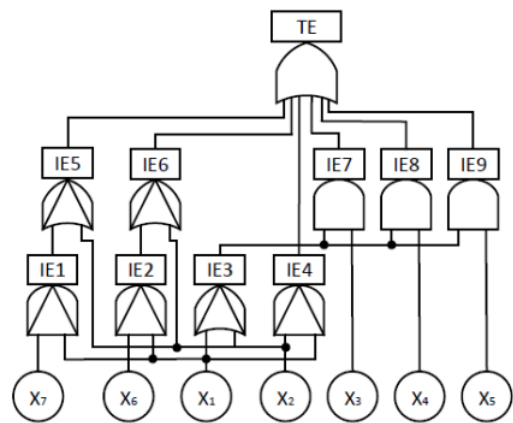
شکل ۷: درخت عیب زمانی مدل شبکه بیزی شکل ۵



شکل ۵: سیستم توزیع سوخت یک کشتی



شکل ۸: رخت عیب زمانی مدل شبکه پتری شکل ۵



شکل ۶: درخت عیب زمانی سیستم توزیع سوخت

به‌طور خلاصه، هر یک از رویکردهای آنالیز کمی TFT دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود است. با این حال، اکثر روش‌های تحلیل کمی TFT به در دسترس بودن داده‌های دقیق خرابی بستگی دارد، و اگر در دسترس نباشد، آن رویکردها نمی‌توانند استفاده شوند. در مقابل، رویکرد مبتنی بر نظریه مجموعه‌های فازی برای تحلیل TFT ما را قادر می‌سازد تا قابلیت اطمینان سیستم را در غیاب داده‌های خرابی واقعی ارزیابی کنیم. علاوه بر این، روش مبتنی بر نظریه مجموعه فازی شهودی به ما اجازه می‌دهد تا سناریوهایی را توصیف کنیم که در آن دانش در مورد میهم بودن داده‌های کمی، در معرض سطوح مختلف اطمینان است. به همین دلیل، ادغام نظریه مجموعه فازی شهودی با استنباط خیره همانطور که در این مقاله پیشنهاد شده است باید انعطاف‌پذیری بیشتری را برای تحلیلگران از نظر بیان داده‌های شکست به صورت اعداد فازی فراهم کند. بنابراین چارچوب پیشنهادی برای تعیین کمیت درخت عیب زمانی که داده‌های دقیق خرابی در دسترس نیست یا کافی نیست، مناسب‌تر است.

بر اساس امکان فازی شهودی رویداد برتر درخت عیب زمانی، معیارهای اهمیت فازی شهودی رویدادهای اساسی با استفاده از رابطه اهمیت فازی شهودی تعیین می‌شوند. علاوه بر این، معیار اهمیت فازی رویدادهای اساسی نیز با توجه به فرآیندی که در [58] شرح داده شده محاسبه می‌شود. رویدادهای اساسی بر اساس بحرانی بودنشان رتبه بندی شده‌اند و نتایج در جدول ۳ گزارش شده است. همانطور که از جدول مشاهده می‌شود، هر دو رویکرد مبتنی بر مجموعه فازی شهودی و رویکرد مبتنی بر مجموعه فازی کلاسیک، رویدادهای اساسی را به یک ترتیب رتبه‌بندی کردند.

جدول ۱: امکانات شکست فازی شهودی توالی‌های برش مینیمال برای حذف

سوخت موتور ۱						$\begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{matrix}$
احتمالات شکست فازی شهودی						
a'_{i3}	a_{i2}	a'_{i1}	a_{i3}	a_{i2}	a_{i1}	
1/543E-3	۳/873E-4	1/046E-4	1/155E-3	3/873E-4	1/328E-4	(X1) (X2) ∧ X3
9/516E-4	1/814E-4	3/230E-5	6/۷۸۸E-4	1/814E-4	4/545E-5	(X1) (X2) ∧ X4
8/551E-4	1/814E-4	3/710E-5	6/210E-4	1/814E-4	5/192E-5	(X1) (X2) ∧ X5
6/810E-4	1/230E-4	2/154E-5	4/741E-4	1/230E-4	2/930E-5	(X6) < X1 (X2)
6/147E-5	8/664E-6	5/581E-7	4/321E-5	8/664E-6	1/013E-6	(X7) < X1 (X2)
2/375E-3	4/996E-4	1/299E-4	1/638E-3	4/996E-4	1/739E-4	X2 < X1

جدول 2: مقایسه عدم اطمینان سیستم برآورد شده توسط سایر رویکردها با عدم

اطمینان برآورد شده توسط رویکرد پیشنهادی

عدم اطمینان		رویکردها
2/484E-3	مبتنی بر اعداد فازی شهودی	جبری
2/139E-3	مبتنی بر اعداد فازی کلاسیک	جبری
1/927E-3	مبتنی بر مقادیر دقیق	
۱/222E-3		مبتنی بر شبکه پتری
1/604E-3	با سه فاصله	مبتنی بر شبکه بیزین
1/681E-3	با چهار فاصله	مبتنی بر شبکه بیزین
1/730E-3	با پنج فاصله	مبتنی بر شبکه بیزین
1/757E-3	با شش فاصله	مبتنی بر شبکه بیزین
1/791E-3	با هفت فاصله	مبتنی بر شبکه بیزین
1/800E-3	با هشت فاصله	مبتنی بر شبکه بیزین
1/814E-3	با نه فاصله	مبتنی بر شبکه بیزین
1/826E-3	با ده فاصله	مبتنی بر شبکه بیزین

جدول ۳: رتبه بندی BEs بر اساس بحرانی بودن

رویکرد درخت عیب زمانی - فازی شهودی		رویکرد درخت عیب زمانی فازی		رویدادهای اساسی
رتبه	$FIM(BE_i)$	رتبه	$IFIM(BE_i)$	
۱	1/597	۱	1/594	X1
۷	0/079	۷	0.077	X2
۲	0/296	۲	0.301	X3
۴	0/253	۴	0.257	X4
۳	0/255	۳	0/260	X5
۵	0/195	۵	0/202	X6
۶	0/181	۶	0/187	X7

در این مقاله، ادبیات به تفسیر در ارتباط با سیر تکاملی سیستم‌ها و تکنیک‌های ارزیابی قابلیت اعتماد سیستم‌ها به طور خاص درخت عیب از جمله؛ درختان عیب کلاسیک، دینامیک، زمانی و دوره‌های متناظر با آن‌ها؛ دروازه‌های استاتیک، دینامیک و زمانی، پرداخته شد. با گذشت زمان سیستم‌های حیاتی ایمنی پیچیده، مجهز تر شده و نهایتاً با ظهور هوش مصنوعی و با توجه به رشد روزافزون و کاربرد آن در سیستم‌ها، دغدغه و چالشی که در عصر جدید با آن مواجه هستیم، قابلیت اعتماد اجزای مبتنی بر هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) است. در حال حاضر نگرانی‌ها از عدم عملکرد صحیح اجزای مبتنی بر هوش مصنوعی است که در حوزه‌های مختلف به کار برده می‌شوند. به عنوان مثال، در حوزه خودروهای خودران که دخالت عنصر انسانی به حداقل ممکن می‌رسد، به غیر از اهمیت قابلیت اعتماد اجزای سخت‌افزاری سیستم، اهمیت قابلیت اعتماد اجزای مبتنی بر هوش مصنوعی به دلیل حذف عنصر انسانی و به جهت حفاظت از دارایی و جان مردم افزایش یافته است. از این رو ضروری است که در بخش آخر به چالش‌های تضمین ایمنی AI/ML و مطالعاتی در این ارتباط پرداخته شود.

چالش‌های تضمین ایمنی AI/ML در کاربردهای صنعتی

پیشرفت در نوآوری‌ها و راه‌حل‌های فن آوری شاهد تولد بسیاری از دستگاه‌ها و فناوری‌ها مانند اینترنت اشیا، محاسبات ابری، دستگاه‌های هوشمند، سیستم‌های مستقل بوده است. این سیستم‌ها بر اساس طراحی‌های مختلف معماری ساخته شده‌اند. این پیشرفت‌ها نیازمند تقاضای محاسباتی بالایی برای دستیابی به اهدافشان است. در تطابق با تقاضای محاسباتی بالای این فناوری‌های جدید، یادگیری ماشین، موازی سازی، پردازش چند هسته ای و مقیاس بندی برخی از رویکردها و تکنیک‌هایی هستند که به کار گرفته شده‌اند.

هوش مصنوعی و به ویژه یادگیری ماشین به موضوعات اصلی در جامعه علمی و همچنین در صنعت تبدیل شده است. به نظر می‌رسد این تکنیک‌ها راه‌حلی برای مشکلات پیچیده هستند و حتی برای کاربردهای

چالش کلی برای امروز و آینده ارزیابی احتمالات و خطرات، استفاده از اجزای مبتنی بر هوش مصنوعی در سیستم‌های حیاتی و پاسخ به این سوال خواهد بود که آیا اجزای مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند بخشی از سیستم‌های قابل اعتماد باشند؟

این مطلب شامل درک بهتری از نحوه عملکرد یادگیری ماشین (هوش مصنوعی قابل توضیح) و همچنین نحوه نظارت و کاهش عدم قطعیت اجزای یادگیری است. در نتیجه باید در مورد اینکه تا چه حد استانداردها و مقررات باید برای انعکاس فناوری جدید اصلاح شوند، بحث شود. این چالش‌ها را نمی‌توان توسط گروه‌های مجزا یا برای برنامه‌های انفرادی حل کرد. این یک بخش پیچیده و وقت‌گیر خواهد بود، اما برای ایجاد یک پایه محکم که بتوان بر اساس آن پیشرفت‌های دیگر را ایجاد کرد، ضروری است. یکی از این امکان‌ها که یک تبادل حرفه‌ای آغاز شده است، کارگاه آموزشی WAISE (کارگاه مهندسی ایمنی هوش مصنوعی) به‌عنوان یک کارگاه ماهواره‌ای در طول کنفرانس‌های SafeComp از سال ۲۰۱۸ است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات بابت آینده تحقیق

نتیجه‌گیری. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که روش تجزیه و تحلیل درخت عیب زمانی فازی شهودی ابزار مفیدی از ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های دینامیک را در زمانی که فازی بودن داده‌های شکست را نمی‌توان با اطمینان بالا بیان کرد، فراهم می‌کند. اثربخشی چارچوب پیشنهادی از طریق کاربرد به یک سیستم عملی و از طریق مقایسه نتایج هر رویکرد نشان داده شده است.

پیشنهادات بابت آینده تحقیق.

مناسب جهت پژوهش‌های آتی باشد.

- عملیات حسابی مرسوم در اعداد فازی می‌تواند با استفاده از اصل گسترش زاده براساس T-نرم‌های مثلثی بسط یابد. عملیات حساب فازی مبتنی بر T-نرم دراستیک^۱ (Tw) دارای مزایایی هستند؛ شکل اعداد فازی را حفظ می‌کند، به طور موثر عدم قطعیت در مورد قابلیت اطمینان (طول بازه قابلیت اطمینان) را کاهش می‌دهد و نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. این عملکرد دقیق به طور موفقیت آمیز پیچیدگی پدیده انباشت ابهام در سیستم‌های فازی را کاهش می‌دهد و مطالعات نشان می‌دهد نتایج دارای دقت و سرعت چشمگیری بوده اند.
- مطالعات اخیر برای مقابله با چالش‌های تضمین ایمنی ML/AI بر پایه رویکردهای سودمند جهت افزایش اعتماد به هوش مصنوعی و برخورد با سناریوهای Edge Cases (سناریوهای غیرمنتظره‌ای که به طور نامنظم یا حتی به ندرت

حیاتی مانند تشخیص پزشکی، تحلیل پیش بینی در امور مالی یا رانندگی مستقل پیشنهاد می‌شوند. هوشمندی، استحکام و قابلیت اطمینان از ویژگی‌های یک سیستم واقعا مستقل هستند. سیستم‌های خودمختار با محیط خود در تعامل هستند و بنابراین نیاز به یک مرور کلی دارند. در انجام این کار، دانش قبلی (یعنی دانش برنامه ریزی شده در پایگاه دانش سیستم)، ماژول محیطی (یعنی اطلاعاتی که سیستم در مورد محیط و موجودیت‌های فعلی دارد) و دنیای واقعی (که به عنوان محیطی که سیستم در حال گسترش است عمل می‌کند) در حصول اطمینان از کارایی و قابلیت اطمینان سیستم مهم هستند. این ماژول‌ها با یکدیگر تعامل دارند. این تعامل به سیستم‌های مستقل اجازه می‌دهد تا اطلاعات جدیدی در مورد محیط خود بیاموزند و به‌دست آورند و در نتیجه تصمیمات و اقدامات بهتری اتخاذ کنند.

اما آیا استفاده از چنین تکنیک‌هایی در سیستم‌های حیاتی در حوزه هوافضا، قطار یا پزشکی با در نظر گرفتن مقررات فعلی در استانداردهای خاص حوزه مربوط به قابلیت اطمینان امکان پذیر خواهد بود؟

با این وجود، جامعه علمی و صنعت نمی‌خواهند مزایای مربوط به تکنیک‌های مبتنی بر هوش مصنوعی را از دست بدهند فقط باید راه‌های جدیدی برای اطمینان از سطح مورد نیاز اطمینان یافت شود. اخبار در مورد پیشرفت فناوری با استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در همه جا در رسانه‌ها وجود دارد. موضوعاتی مانند پیش بینی قیمت سهام، همکاری ربات‌های انسانی در محیط‌های تولید یا تشخیص اشیا برای رانندگی خودران مورد بررسی قرار می‌گیرند. نمونه‌های فعلی به اهدافی دست می‌یابند که چندین سال پیش غیرقابل تصور بود.

قیاس بعدی این است که این روش‌ها را برای تمام سناریوهای ممکن که می‌توانند از آن بهره‌مند شوند، به کار ببریم. حتی سیستم‌های حیاتی مانند نیروگاه‌ها، تشخیص‌های پزشکی یا حمل و نقل می‌توانند به‌طور بالقوه با کمک یادگیری ماشین بهبود چشمگیری داشته باشند. حفظ برنامه زمانبندی یا مصرف انرژی می‌تواند بهینه شود. سیستم‌های حمل و نقل و ترافیک در شهرها می‌توانند از بهینه‌سازی مسیرها یا پیش بینی ظرفیت مسافران سود ببرند و حتی ممکن است منجر به کاهش آلودگی هوا شود. این‌ها نمونه‌هایی برای اهداف مدیریتی هستند، اما اهداف عملیاتی را نیز می‌توان افزایش داد. به عنوان مثال، اتومبیل‌های خودران می‌توانند به حمل و نقل ایمن تر و سازگار با محیط زیست منجر شوند. اما یک مانع بالقوه وجود دارد: چنین برنامه‌های کاربردی حیاتی باید قابل اعتماد باشند، اما سیستم‌های قابل اعتماد زیربنای مقررات سختگیرانه‌ای هستند که استفاده از روش‌های نامشخص مانند یادگیری ماشین را ممنوع می‌کند. بنابراین چگونه می‌توان از مزایای این فناوری استفاده کرد و همچنان با استانداردها و مقرراتی که توسعه و عملکرد سیستم‌های حیاتی را تعریف می‌کند مطابقت داشت؟

^۱Weakest T-norm / Drastic T-norm

- رخ می‌دهند، Cases Edge نامیده می‌شوند.) با استفاده از روش‌های ایمنی و کاربرد رویکردهای تحلیلی از جمله تحلیل درخت عیب برای تضمین قابلیت اعتماد سیستم‌های حیاتی جهت محافظت در برابر احتمال تصمیمات نادرست سیستم است. در این راستا مطالعاتی برای ارزیابی کمی قابلیت اعتماد سیستم‌ها بر پایه تحلیل درخت عیب با کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین انجام شده است که می‌تواند یک گزینه بالقوه برای تحقیقات آینده باشد.
- مراجع**
- [1] Nicolle, C. K. E. a. N. C. a. C., "Understandable Big Data: A survey," *Computer Science Review*, Volume 17, pp. 70 – 81, 2015.
 - [2] Company, T. B., *System Safety Symposium*, Available from University of Washington Library. Seattle, Washington,: s.n, 1965.
 - [3] Aggarwal, K., "An Efficient Simple Algorithm for Fault Tree Automatic Synthesis from the Reliability Graph," *IEEE Transactions on Reliability*, Volume 28, pp. 309–315. 1979.
 - [4] Fryer, R. N. . a. I. L. . a. D. M., "An Efficient Computational Technique for Evaluating the Cut/Tie Sets and Common-Cause Failures of Complex Systems," *IEEE Transactions on Reliability*, Volume R-30, pp. 101-109, 1981.
 - [5] Andow, P. K., "Difficulties in Fault-Tree Synthesis for Process Plant," *IEEE Transactions on Reliability*, Volume R-29, pp. 2-9, 1980.
 - [6] Schenk, N. N. . a. B. A. . a. K. F., "An Efficient Algorithm for Reducing the Complexity of Computation in Fault Tree Analysis," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Volume 23, pp. 1442-1446, 1976.
 - [7] Ericson, C. A. a. L. C., "Fault tree analysis," *In: System Safety Conference*, Orlando, Florida. s.l.:s.n., pp. 1–9, 1999.
 - [8] Kales, P., "Reliability: for technology, engineering, and management," *s.l.:Pearson College Division*, 1998.
 - [9] Lee, C. a. L. T. a. L. N. a. C. U., "The study of strategy on new equipment maintenance," *Fuzzy Sets and Mathematics*, pp. 37–44, 1999.
 - [10] Wang, G.-S. L. a. M.-J. J., "Fuzzy fault-tree analysis using failure possibility," *Microelectronics Reliability*, Volume 33, pp. 583 – 597, 1993.
 - [11] Wang, C.-T. L. a. M.-J. J., "Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets," *Reliability Engineering System Safety*, Volume 58, pp. 205 – 213, 1997.
 - [12] Raj, P. S. a. A. B. a. V., "Uncertainty in fault tree analysis: A fuzzy approach," *Fuzzy Sets and Systems*, Volume 83, pp. 135 – 141, 1996.
 - [13] Ghadhab, M., "Model-Based Safety Analysis for Vehicle Guidance Systems," *In: Computer Safety, Reliability, and Security*. s.l.:Springer International Publishing, pp. 3–19, 2017.
 - [14] Cardosi, K. M. a. F. B. a. H. D. a. o., *Runway safety*. United States. Federal Aviation Administration: s.n, 2001.
 - [15] Lambert, H. E., "Fault Trees for Diagnosis of System Fault Conditions," *Nuclear Science and Engineering*, 62(1), pp. 20-34, 1977.
 - [16] Vesely, W. E. a. G. F. F. a. R. N. H. a. H. D. F., "Fault tree handbook," *U.S. Nuclear Regulatory Commission*, NUREG-0492, Washington, DC.. s.l.:s.n, 1981.
- [17] S. Kabir, M. Yazdi, J. I. Aizpurua, and Y. Papadopoulos, "Uncertainty-aware dynamic reliability analysis framework for complex systems," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 29499–29515, 2018.
 - [18] J. Bechta Dugan, S. J. Bavuso, and M. A. Boyd, "Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems," *IEEE Trans. Rel.*, vol. 41, no. 3, pp. 363–377, Sep. 1992.
 - [19] M. Walker, "Pandora: A logic for the qualitative analysis of temporal fault trees," *Ph.D. dissertation, Dept. Comput. Sci.*, Univ. Hull, Hull, U.K., 2009.
 - [20] G. Merle, J.-M. Roussel, J.-J. Lesage, V. Perchet, and N. Vayatis, "Quantitative analysis of dynamic fault trees based on the coupling of structure functions and Monte Carlo simulation," *Qual. Rel. Eng. Int.*, vol. 32, no. 1, pp. 7–18, 2016.
 - [21] G. Merle, J. M. Roussel, J. J. Lesage, and A. Bobbio, "Probabilistic algebraic analysis of fault trees with priority dynamic gates and repeated events," *IEEE Trans. Rel.*, vol. 59, no. 1, pp. 250–261, Mar. 2010.
 - [22] J. B. Dugan, S. J. Bavuso, and M. A. Boyd, "Fault trees and Markov models for reliability analysis of fault-tolerant digital systems," *Rel. Eng. Syst. Saf.*, vol. 39, no. 3, pp. 291–307, 1993.
 - [23] H. Boudali, P. Crouzen, and M. Stoelinga, "A rigorous, compositional, and extensible framework for dynamic fault tree analysis," *IEEE Trans. Dependable Secure Comput.*, vol. 7, no. 2, pp. 128–143, Apr. 2010.
 - [24] P. Zhu, Y. Guo, S. Si, and J. Han, "A stochastic analysis of competing failures with propagation effects in functional dependency gates," *IISE Trans.*, vol. 49, no. 11, pp. 1050–1064, 2017.
 - [25] P. Zhu, J. Han, L. Liu, and F. Lombardi, "Reliability evaluation of phasedmission systems using stochastic computation," *IEEE Trans. Rel.*, vol. 65, no. 3, pp. 1612–1623, Sep. 2016.
 - [26] D. Codetta-Raiteri and L. Portinale, "Generalized continuous time Bayesian networks as a modelling and analysis formalism for dependable systems," *Rel. Eng. Syst. Saf.*, vol. 167, pp. 639–651, Nov. 2017.
 - [27] H. Boudali and J. Bechta Dugan, "A continuous-time Bayesian network reliability modeling, and analysis framework," *IEEE Trans. Rel.*, vol. 55, no. 1, pp. 86–97, Mar. 2006.
 - [28] L. Xing, O. Tannous, and J. B. Dugan, "Reliability analysis of nonrepairable cold-standby systems using sequential binary decision diagrams," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Syst. Humans*, vol. 42, no. 3, pp. 715–726, May 2012.
 - [29] D. Ge, M. Lin, Y. Yang, R. Zhang, and Q. Chou, "Quantitative analysis of dynamic fault trees using improved sequential binary decision diagrams," *Rel. Eng. Syst. Saf.*, vol. 142, pp. 289–299, Oct. 2015.
 - [30] MathWorks. MATLAB Simulink. [Online]. Available: <https://uk.mathworks.com/products/simulink.html>, 2019.
 - [31] EAST-ADL Association, EAST-ADL V2.1.12 Specification. [Online]. Available: <http://www.east-adl.info/Specification.html>, 2014.
 - [32] J. Delange, P. Feiler, D. Gluch, and J. J. Hudak, "AADL fault modeling and analysis within an ARP4761 safety assessment," *Softw. Eng. Inst.*, Pittsburgh, PA, USA, Tech. Rep. CMU/SEI-2014-TR-020, Oct. 2014.
 - [33] S. Sharvia, S. Kabir, M. Walker, and Y. Papadopoulos, "Modelbased dependability analysis: State-of-the-art, challenges, and future outlook," *in Software Quality Assurance: In Large Scale and Complex Software-intensive*

- [52] M. Kumar and S. P. Yadav, "The weakest t-norm based intuitionistic fuzzy fault-tree analysis to evaluate system reliability," *ISA Trans.*, vol. 51, no. 4, pp. 531–538, 2012.
- [53] M. Kumar and S. P. Yadav, "A novel approach for analyzing fuzzy system reliability using different types of intuitionistic fuzzy failure rates of components," *ISA Trans.*, vol. 51, no. 2, pp. 288–297, 2012.
- [54] M. Kumar, "Applying weakest t-norm based approximate intuitionistic fuzzy arithmetic operations on different types of intuitionistic fuzzy numbers to evaluate reliability of PCBA fault," *Appl. Soft Comput.*, vol. 23, pp. 387–406, Oct. 2014.
- [55] K.-P. Lin, W. Wen, C.-C. Chou, C.-H. Jen, and K.-C. Hung, "Applying fuzzy GERT with approximate fuzzy arithmetic based on the weakest tnorm operations to evaluate repairable reliability," *Appl. Math. Model.*, vol. 35, no. 11, pp. 5314–5325, Nov. 2011.
- [56] K.-H. Chang and C.-H. Cheng, "A novel general approach to evaluating the PCBA for components with different membership function," *Appl. Soft Comput.*, vol. 9, no. 3, pp. 1044–1056, 2009.
- [57] S. Kabir, E. Edifor, M. Walker, and N. Gordon, "Quantification of temporal fault trees based on fuzzy set theory," in *Proc. 9th Int. Conf. Dependability Complex Syst. DepCoS-RELCOMEX*. Brunów, Germany: Springer, pp. 255–264, 2014.
- [58] S. Kabir, M. Walker, Y. Papadopoulos, E. Rűde, and P. Securius, "Fuzzy temporal fault tree analysis of dynamic systems," *Int. J. Approx. Reasoning*, vol. 77, pp. 20–37, Oct. 2016.
- [59] M. Kumar, "An area if-defuzzification technique and intuitionistic fuzzy reliability assessment of nuclear basic events of fault tree analysis," in *Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms*, Singapore: Springer, pp. 845–856, 2019.
- [60] H. Garg, "A novel approach for analyzing the reliability of series-parallel system using credibility theory and different types of intuitionistic fuzzy numbers," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 38, no. 3, pp. 1021–1035, Mar. 2016.
- [61] Y. Papadopoulos, M. Walker, D. Parker, S. Sharvia, L. Bottaci, S. Kabir, L. Azevedo, and I. Sorokos, "A synthesis of logic and bio-inspired techniques in the design of dependable systems," *Annu. Rev. Control*, vol. 41, pp. 170–182, Jan. 2016.
- [62] S. Kabir, Y. Papadopoulos, M. Walker, D. Parker, J. I. Aizpurua, J. Lampe, and E. Rűde, "A model-based extension to HiP-HOPS for dynamic fault propagation studies," in *Proc. Int. Symp. Model-Based Saf. Assessment*. Cham, Switzerland: Springer, pp. 163–178, 2017.
- [63] S. Helvacıoglu and E. Ozen, "Fuzzy based failure modes and effect analysis for yacht system design," *Ocean Eng.*, vol. 79, pp. 131–141, Mar. 2014.
- [64] M. Yazdi, S. Daneshvar, and H. Setareh, "An extension to fuzzy developed failure mode and effects analysis (FDFMEA) application for aircraft landing system," *Saf. Sci.*, vol. 98, pp. 113–123, Oct. 2017.
- [65] M. Yazdi, "An extension of the fuzzy improved risk graph and fuzzy analytical hierarchy process for determination of chemical complex safety integrity levels," *Int. J. Occupat. Saf. Ergonom.*, vol. 25, no. 4, pp. 551–561, 2017.
- [66] R. Cooke, *Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science*. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 1991.
- [67] N. Dalkey, O. Helmer, and O. Helmer, "An experimental application of the delphi method to the use of experts," *Manage. Sci.*, vol. 9, no. 3, pp. 458–467, Apr. 1963.
- Systems*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, pp. 251–278, 2015.
- [34] E. Edifor, M. Walker, and N. Gordon, "Quantification of priority-OR gates in temporal fault trees," in *Computer Safety, Reliability, and Security* (Lecture Notes in Computer Science), vol. 7612, F. Ortmeier and P. Daniel, Eds. Berlin, Germany: Springer, pp. 99–110, 2012.
- [35] S. Kabir, M. Walker, and Y. Papadopoulos, "Reliability analysis of dynamic systems by translating temporal fault trees into Bayesian networks," in *Model-Based Safety Assessment* (Lecture Notes in Computer Science), vol. 8822, F. Ortmeier and A. Rauzy, Eds. Cham, Switzerland: Springer, pp. 96–109, 2014.
- [36] S. Kabir, M. Walker, and Y. Papadopoulos, "Quantitative evaluation of pandora temporal fault trees via Petri nets," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 21, pp. 458–463, 2015.
- [37] S. Kabir, M. Walker, and Y. Papadopoulos, "Dynamic system safety analysis in HiP-HOPS with Petri nets and Bayesian networks," *Saf. Sci.*, vol. 105, pp. 55–70, Jun. 2018.
- [38] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Inf. Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965.
- [39] H. Tanaka, L. T. Fan, F. S. Lai, and K. Toguchi, "Fault-tree analysis by fuzzy probability," *IEEE Trans. Rel.*, vol. R-32, no. 5, pp. 453–457, Dec. 1983.
- [40] Y. A. Mahmood, A. Ahmadi, A. K. Verma, A. Srividya, and U. Kumar, "Fuzzy fault tree analysis: A review of concept and application," *Int. J. Syst. Assurance Eng. Manage.*, vol. 4, no. 1, pp. 19–32, Mar. 2013.
- [41] S. Kabir and Y. Papadopoulos, "A review of applications of fuzzy sets to safety and reliability engineering," *Int. J. Approx. Reasoning*, vol. 100, pp. 29–55, Sep. 2018.
- [42] X. Song, Z. Zhai, P. Zhu, and J. Han, "A stochastic computational approach for the analysis of fuzzy systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 13465–13477, 2017.
- [43] C.-T. Lin and M.-J. J. Wang, "Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets," *Rel. Eng. Syst. Saf.*, vol. 58, no. 3, pp. 205–213, 1997.
- [44] K. T. Atanassov, "Intuitionistic fuzzy sets," *Central Tech. Library, Bulgarian Acad. Sci.*, Sofia, Bulgaria, Tech. Rep. 1697/84, 1983.
- [45] K. T. Atanassov, "Intuitionistic fuzzy sets," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 87–96, Aug. 1986.
- [46] R. Biswas, "On fuzzy sets and intuitionistic fuzzy sets," in *Proc. NIFS*, vol. 3, no. 1, pp. 3–11, 1997.
- [47] P. Burillo, H. Bustince, and V. Mohedano, "Some definitions of intuitionistic fuzzy number. First properties," in *Proc. 1st Workshop Fuzzy Based Expert Syst.*, pp. 53–55, 1994.
- [48] M.-H. Shu, C.-H. Cheng, and J.-R. Chang, "Using intuitionistic fuzzy sets for fault-tree analysis on printed circuit board assembly," *Microelectron. Rel.*, vol. 46, no. 12, pp. 2139–2148, 2006.
- [49] J.-R. Chang, K.-H. Chang, S.-H. Liao, and C.-H. Cheng, "The reliability of general vague fault-tree analysis on weapon systems fault diagnosis," *Soft Comput.*, vol. 10, no. 7, pp. 531–542, 2006.
- [50] S.-R. Cheng, B. Lin, B.-M. Hsu, and M.-H. Shu, "Fault-tree analysis for liquefied natural gas terminal emergency shutdown system," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 9, pp. 11918–11924, 2009.
- [51] M. Kumar, S. P. Yadav, and S. Kumar, "Fuzzy system reliability evaluation using time-dependent intuitionistic fuzzy set," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 44, no. 1, pp. 50–66, 2013.

- [73] D.-Y. Chang, "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 95, no. 3, pp. 649–655, 1996.
- [74] M. Yazdi and E. Zarei, "Uncertainty handling in the safety risk analysis: An integrated approach based on fuzzy fault tree analysis," *J. Failure Anal. Prevention*, vol. 18, no. 2, pp. 392–404, 2018.
- [75] T. Onisawa, "An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 87–103, 1988.
- [76] Kabir, Sohag and Geok, Tan Kim and Kumar, Mohit and Yazdi, Mohammad and Hossain, Ferdous, "A Method for Temporal Fault Tree Analysis Using Intuitionistic Fuzzy Set and Expert Elicitation," *IEEE Access.*, vol. 8, pp. 980–996, 2020.
- [68] C. R. Fox and R. T. Clemen, "Subjective probability assessment in decision analysis: Partition dependence and bias toward the ignorance prior," *Manage. Sci.*, vol. 51, no. 9, pp. 1417–1432, 2005.
- [69] T. L. Saaty, *Creative Thinking, Problem Solving and Decision Making*. Tucson, AZ, USA: RWS, 2001.
- [70] Y.-M. Wang and K.-S. Chin, "Fuzzy analytic hierarchy process: A logarithmic fuzzy preference programming methodology," *Int. J. Approx. Reasoning*, vol. 52, no. 4, pp. 541–553, Jun. 2011.
- [71] M. Yazdi, "Hybrid probabilistic risk assessment using fuzzy FTA and fuzzy AHP in a process industry," *J. Failure Anal. Prevention*, vol. 17, no. 4, pp. 756–764, 2017.
- [72] J. J. Buckley, "Fuzzy hierarchical analysis," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 233–247, Dec. 1985.