هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

ارزیابی ریسک احتمالاتی با استفاده از آنالیز درخت عیب فازی و شبکه‌های بیزی

مریم سلیمی‌فرد[۱]، فاطمه خسروسرشکی[۲]، روح‌اله مشایخی[۳]، صبا شیرزادی[۴]، سعید ادیب نظری[۵]

۱- پژوهشگر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، maryam.salimifard@researcher.sharif.edu

۲- پژوهشگر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، fatemeh.sereshki@researcher.sharif.edu

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، mashayekhi@airport.ir

۴- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، shirzadi_saba@ae.sharif.ir

۵- استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، adib@sharif.edu

چکیده

ارزیابی و مدیریت ریسک اغلب در سیستم‌های پیچیده، مانند هواپیما، برای جلوگیری از خطرات و کاهش خسارت‌های جانی و مالی به کار می‌روند و نقش مهمی در نگهداری بهینه این سیستم‌ها بازی می‌کنند. در صنعت هواپیمایی، انجام به موقع ارزیابی ریسک و مدیریت آن برای بخش‌های مختلف هواپیما می‌تواند از ضرر و زیان جلوگیری کند و یا تا حد امکان آسیب به هواپیما را از بین ببرد. از طرفی، تجزیه و تحلیل ایمنی و ارزیابی ریسک سازه هواپیما به دلیل کمبود داده‌ها و اطلاعات اولیه امری بسیار چالش برانگیز است. الگوریتم‌های احتمالاتی از ابزارهای اصلی در مدل‌سازی سیستم‌ها در کاربردهای ریسک، قابلیت اطمینان و ایمنی هستند. از این رو، در این مقاله، از آنالیز درخت عیب فازی و شبکه‌های بیزی جهت ارزیابی احتمالاتی ریسک سازه یک هواپیما استفاده شده است. در این راستا، ابتدا یک درخت عیب متناظر با حالت‌های خرابی مشاهده شده در این هواپیما توسعه می‌یابد و سپس احتمال وقوع رویدادهای پایه‌ای با استفاده از ترکیب تکنیک استنباط کارشناسی و نظریه مجموعه‌های فازی محاسبه می‌شود. سپس درخت عیب فازی حاصل به شبکه بیزی متناظر تبدیل می‌گردد. در نهایت، ارزیابی ریسک با تعریف سناریوهای مختلف بر اساس شبکه بیزی انجام می‌شود. رویکرد پیشنهادی یک روش عملی و معقول برای ارزیابی احتمالاتی ریسک ارائه می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی ریسک، آنالیز درخت عیب فازی، شبکه‌های بیزی، نظریه مجموعه‌های فازی، استنباط کارشناسی

مقدمه

صنعت هواپیمایی ارتباط قابل توجهی با مباحث ایمنی دارد. با گذشت زمان، منابع بالقوه بسیاری برای آسیب در سازه هواپیما وجود دارند که می‌توانند منجر به خرابی سازه شوند و در نتیجه قابلیت اطمینان و در دسترس بودن هواپیما را کاهش دهند [۱]. با استفاده از رویکردهای ارزیابی و مدیریت ریسک، می‌توان خطرات بالقوه را به خوبی شناسایی کرد و در نتیجه ایمنی و قابلیت اطمینان را بهبود بخشید. ارزیابی و مدیریت ریسک می‌تواند برای تصمیم‌گیری‌های مهم در مورد فواصل بازرسی، انتخاب تکنیک‌های بازرسی غیرمخرب مناسب و تعیین ماموریت‌ها و پارامترهای پرواز استفاده شود. خرابی هواپیما ممکن است با از دست رفتن عملکرد یک یا چندین جزء کلیدی نمایان شود. خرابی در اجزای هواپیما عواقب جدی به دنبال دارد و در بسیاری از موارد منجر به آسیب قابل توجه یا از دست دادن کامل هواپیما، تخریب اموال و از همه مهم‌تر، از دست دادن جان انسان‌ها می‌شود. بررسی خرابی-ها/حوادث در صنایع هوانوردی یک کار پیچیده و چالش برانگیز است. تنها با تجزیه و تحلیل سیستماتیک خرابی‌ها می‌توان عوامل مؤثر در یک حادثه/سانحه را تعیین کرد و در نتیجه اقدامات پیشگیرانه را آغاز نمود. ارزیابی ریسک از طریق فرآیند شناسایی و اولویت‌بندی علل مهم خرابی و پس از آن تدوین استراتژی‌های تعمیر و نگهداری مؤثر، نقش مهمی در تصمیم‌گیری‌های تعمیر و نگهداری، برای مثال در مورد زمان تعویض قطعه یا حتی بازنشستگی هواپیما ایفا می‌کند [۲].

تجزیه و تحلیل ایمنی و ارزیابی ریسک سازه هواپیما برای بررسی قابلیت اطمینان، ایمنی و ملاحظات اقتصادی، به عنوان یک جزء، نیازمند تحلیل‌های دقیق و کارآمد توسط الگوریتم‌های احتمالاتی است. از جمله متداول‌ترین روش‌های کاربردی در این زمینه می‌توان به «تجزیه و تحلیل تحلیل حالت‌ها و اثرات خرابی یا FMEA[1]»، «آنالیز درخت عیب یا FTA[2]» و «شبکه‌های بیزی یا BNs[3]» اشاره کرد. روش‌های آنالیز درخت عیب و شبکه‌های بیزی جزء تکنیک‌های احتمالاتی و استدلال گرافیکی هستند و به دلیل عملکرد رضایت‌بخش آن‌ها در بیان علل رایج خرابی سیستم، به طور گسترده‌ای برای ارزیابی ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده و مقیاس بزرگ در تمامی زمینه‌های مهندسی مانند هوافضا، راکتورهای هسته‌ای، صنعت پتروشیمی، خطوط لوله و غیره مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳, ۴]. آنالیز درخت عیب به خوبی می‌تواند خرابی‌ها را بر اساس علل و عوامل ایجاد کننده آن با استفاده از اطلاعات موجود توصیف نماید [۵, ۶]. از این رو، این تکنیک برای تجزیه و تحلیل حالت‌های خرابی و تعیین «رویدادهای پایه‌ای یا BEs[4]» منجر به خرابی معرفی شده است. از طرفی، با توجه به وجود عدم قطعیت در تشخیص روند یا رشد آسیب[5] در برخی از مقالات استفاده از آنالیز درخت عیب و سپس توسعه آن به شبکه‌های بیزی پیشنهاد شده است. شبکه‌های بیزی به دلیل ساختار گرافیکی بصری از عوامل تأثیرگذار و تجزیه و تحلیل کمی روابط بین آن‌ها، به طور گسترده برای ارزیابی کمی ریسک استفاده می‌شوند. علاوه بر این، شبکه‌های بیزی می‌توانند به خوبی با عدم قطعیت‌ها مقابله کنند، هرچند که برای توسعه مدل‌های شبکه بیزی معمولاً به دانش بسیار تخصصی ریاضیات، احتمالات، آمار و محاسبات نیاز است [۷]. برای مثال، مدل تجزیه و تحلیل خرابی احتمالاتی[6] مبتنی بر ریسک پیشنهاد شده در [۸] قادر است اجزای حیاتی و حالت‌ها و مکانیسم‌های خرابی بحرانی را برای هر جزء با به‌روز رسانی احتمال خرابی، پیش‌بینی کرده و تشخیص دهد. در [۹] یک روش تشخیص عیب بر اساس درخت عیب و شبکه‌های بیزی ارائه شده و به یکی از زیر سیستم‌های مهم سیستم کنترل هواپیما به‌عنوان مطالعه موردی اعمال شده است. در [۱۰] نیز یک مکانیزم تحلیل خطای انسانی بر اساس آنالیز درخت عیب و شبکه بیزی ارائه شده است. در آنالیز درخت عیب مرسوم، ابهامات و عدم قطعیت‌های رویدادهای پایه‌ای را نمی‌توان به طور مؤثر مدیریت کرد. بنابراین، استفاده از نظریه مجموعه‌های فازی[7] برای تخمین احتمال وقوع رویدادهای پایه‌ای و متعاقباً «رویداد راسی یا TE[8]» سودمند است. چنین ترکیبی از آنالیز درخت عیب و منطق فازی، «آنالیز درخت عیب فازی یا FFTA[9]» نامیده می‌شود [۵, ۱۱].

ارزیابی ریسک سازه هواپیما، به‌عنوان یکی از بخش‌های اصلی هواپیما، اطلاعات کیفی و کمی را برای ارزیابی ایمنی و عمر مفید هواپیما ارائه می‌دهد. در پژوهش‌ها، موضوع ارزیابی ریسک همواره مورد توجه محققان و متخصصان بوده است و نتایج مفیدی ارائه شده است. برای مثال، مقاله [۱۲] به بررسی روش‌ها و رویکردهای ارزیابی ریسک سازه هواپیما پرداخته است و در آن تعدادی از مطالعات موردی ارزیابی ریسک انجام شده برای هواپیماهای مختلف مرور شده است.

در این مقاله، یک روش کارآمد جهت ارزیابی کیفی و کمی احتمال خرابی سازه یک هواپیمای مفروض پیشنهاد شده است. برای این منظور، از «آنالیز درخت عیب فازی یا FFTA» جهت استخراج رویدادهای پایه‌ای مؤثر و سپس تعیین احتمال وقوع رویدادهای پایه‌ای استفاده می‌شود. احتمال وقوع رویدادهای پایه‌ای با استفاده از ترکیب تکنیک استنباط کارشناسی[10] و نظریه مجموعه‌های فازی تعیین می‌شوند. در ادامه، به منظور ارزیابی ریسک خرابی سازه هواپیما، یک شبکه بیزی توسعه داده می‌شود و در پایان، ارزیابی ریسک انجام می‌گردد. نتایج این مقاله می‌تواند به درک محتمل‌ترین عوامل مؤثر در از دست دادن یکپارچگی سازه هواپیمای مدنظر کمک نماید. فرآیند ارزیابی ریسک طراحی شده در این مقاله را می‌توان در دو مرحله خلاصه کرد:

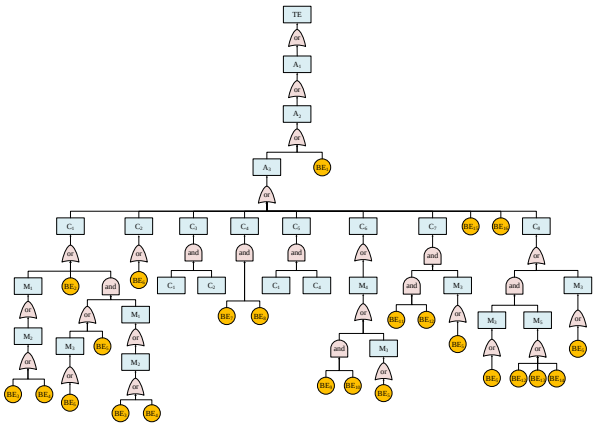
۱. آنالیز درخت عیب به صورت کیفی و سپس تعیین مقدار احتمال رویدادهای پایه‌ای با استفاده از ترکیب تکنیک استنباط کارشناسی و نظریه مجموعه‌های فازی
۲. نگاشت درخت عیب پیشنهادی به شبکه بیزی متناظر و ارزیابی ریسک با استفاده از شبکه بیزی توسعه یافته

آنالیز درخت عیب فازی

آنالیز درخت عیب یک تکنیک گرافیکی برای تجزیه و تحلیل خرابی است که به دلیل سهولت استفاده و اثربخشی آن در کشف و نمایش تعامل خرابی اجزا در یک سیستم، اولین بار در صنعت هواپیمایی استفاده شد و سپس از دهه ۱۹۷۰ به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله تولید انرژی هسته‌ای، هوانوردی، خودرو و سایر صنایع پرخطر نیز مورد استفاده قرار گرفت [۱۳, ۱۴]. امروزه آنالیز درخت عیب به عنوان یکی از قوی‌ترین ابزارهای ارزیابی ایمنی سیستم‌های پیچیده محسوب می‌شود و یک روش ساختاری متداول برای تعیین علل بالقوه یک رویداد نامطلوب است که ممکن

[1] Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)
[2] Fault Tree Analysis (FTA)
[3] Bayesian Network (BN)
[4] Basic Events (BEs)
[5] Damage Growth
[6] Probabilistic Failure Analysis
[7] Fuzzy Set Theory
[8] Top Event (TE)
[9] Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA)
[10] Expert Elicitation

است خطرات ایمنی ایجاد کند و یا پیامدهای اقتصادی به دنبال داشته باشد. با استفاده از درخت عیب، علل بالقوه خرابی سیستم به طور سیستماتیک با استفاده از یک چارچوب قیاسی سلسله مراتبی ترسیم می‌شوند. عناصر اصلی درخت عیب شامل «رویداد راسی یا Top Event»، «رویدادهای میانی یا Intermediate Events» و «رویدادهای پایه‌ای یا Basic Events» است که در آن از گیت‌های منطقی مانند «AND» و «OR» برای نشان دادن روابط بین رویدادهای مختلف استفاده می‌شود. در بحث آنالیز درخت عیب، تعیین تمام حالت‌های خرابی برای سیستم تحت بررسی و اثرات آن‌ها بر رویداد راسی (TE) سخت‌ترین بخش کار است و این مرحله تا حد زیادی به دانش و تجربه گروه متخصصان درگیر در پروژه بستگی دارد. در این مقاله، به منظور ارزیابی سازه هواپیمای مدنظر، «از دست دادن یکپارچگی سازه/کاهش عمر سرویس‌دهی» به عنوان رویداد راسی (TE) در درخت عیب در نظر گرفته شده است. سپس، با هدف شناسایی عوامل مؤثر در از دست دادن یکپارچگی سازه و در نتیجه کاهش عمر سرویس‌دهی سازه هواپیما، سعی در مدل‌سازی کیفی این موضوع شده است که این گام یک مرحله حیاتی در ساخت درخت عیب است. درخت عیب طراحی شده برای سازه هواپیمای مفروض در شکل ۱ نمایش داده شده است. لیست پارامترهای مربوط به درخت عیب طراحی شده در جدول ۱ بیان شده است.



شکل ۱: درخت عیب طراحی شده

به منظور تحلیل کمی درخت عیب، می‌بایست در ابتدا مقادیر احتمال وقوع رویدادهای پایه‌ای (BEs) تعیین شوند. درخت عیب طراحی شده در مجموع دارای ۱۶ رویداد پایه‌ای است (با نام‌های BE_1 تا BE_{16}) که به دلیل عدم وجود داده‌های عددی در اسناد و مقالات موجود، از تکنیک استنباط کارشناسی و نظریه مجموعه-های فازی جهت استخراج و کمی‌سازی دانش متخصصین مرتبط در این موضوع استفاده شده است. نظریه مجموعه‌های فازی برای محاسبه احتمال رویدادهای پایه‌ای بر اساس دانش ذهنی و نادقیق بسیار مناسب است. روند اجرای استنباط کارشناسی با استفاده از نظریه مجموعه‌های فازی مطابق شکل ۲ در ادامه بیان می‌شود.

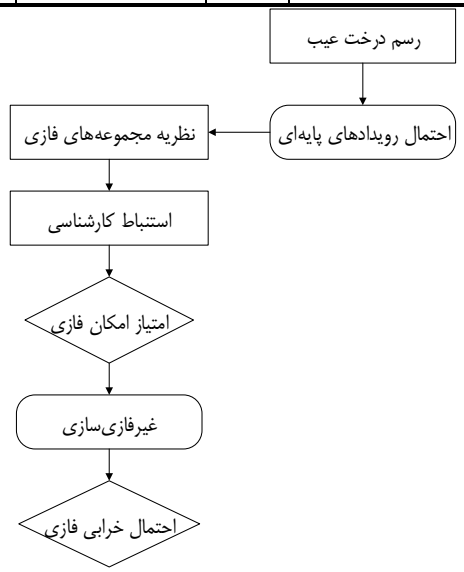
ابتدا ۷ دسته اصطلاح زبانی[۱] به صورت {Very Low (VL)، Low (L)، Medium Low (ML)، Medium (M)، Medium High (MH)، High (H) و Very High (VH)} برای توصیف قضاوت زبانی کارشناسان تعریف می‌شود. سپس می‌بایست مجموعه‌های فازی یا توابع عضویت[۲] متناظر با هر دسته را تعیین نمود. توابع عضویت مختلفی برای فازی‌سازی[۳] اصطلاحات زبانی وجود دارد، مانند توابع عضویت مثلثی[۴]، ذوزنقه‌ای[۵] گاوسی[۶] یا زنگوله‌ای شکل[۷]. در این مقاله، از اعداد فازی مثلثی و اعداد فازی ذوزنقه‌ای برای توصیف قضاوت کارشناسان استفاده شده است. بنابراین بازه [0,1] به ۷ مجموعه فازی با توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای مطابق شکل ۳ تفکیک شده است. عدد فازی مرتبط با هر اصطلاح زبانی در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۱: پارامترهای درخت عیب طراحی شده

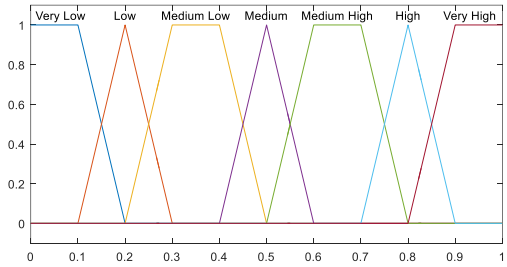
Event Name	Description	Event Name	Description
TE	Loss of Structural Integrity/Service Life Reduction	BE_1	Manufacturing/ Design Defects
A_1	Damage Growth	BE_2	Cyclic Thermal Loading
A_2	Damage Nucleation: Crack, Dent, Scratch, Discoloration, Missing Rivet Heads	BE_3	Flight Loads
A_3	In-Service Defects	BE_4	Pressurization
C_1	Fatigue	BE_5	Manufacturing/Fabrication/ Maintenance/Repair Defects
C_2	Fretting	BE_6	Low Oscillatory Relative Movement
C_3	Fretting Fatigue	BE_7	Environmental Conditions
C_4	Corrosion	BE_8	Coating/Paint Degradation
C_5	Corrosion Fatigue	BE_9	Thermal Environment
C_6	Creep	BE_{10}	Mechanical Loading
C_7	Stress Corrosion Cracking (SCC)	BE_{11}	Chemical Environmental
C_8	Yield or Fracture	BE_{12}	Sustain Loading
M_1	Fatigue Loading	BE_{13}	Monotonic Loading
M_2	Fluctuating/ Cyclic Loading	BE_{14}	Overloading

[۱] Linguistic Term
[۲] Membership Functions
[۳] Fuzzification
[۴] Triangular
[۵] Trapezoidal
[۶] Gaussian
[۷] Bell Shaped

M_3	Residual Stress	BE_{15}	Wear/Erosion
M_4	Sustain Loading	BE_{16}	Excess Deformation
M_5	Loading		



شکل ۲: مراحل تعیین احتمال رویدادهای پایه‌ای درخت عیب



شکل ۳: توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای فازی

جدول ۲: عدد فازی مرتبط با هر اصطلاح زبانی

Linguistic Term	Fuzzy Numbers
Very Low (VL)	(0.0,0.0,0.1,0.2)
Low (L)	(0.1,0.2,0.2,0.3)
Medium Low (ML)	(0.2,0.3,0.4,0.5)
Medium (M)	(0.4,0.5,0.5,0.6)
Medium High (MH)	(0.5,0.6,0.7,0.8)
High (H)	(0.7,0.8,0.8,0.9)
Very High (VH)	(0.8,0.9,1.0,1.0)

سپس کارشناسان از زمینه‌های مختلف و مرتبط برای قضاوت در مورد رویدادهای پایه‌ای انتخاب می‌شوند و امکان وقوع هر یک از رویدادهای پایه‌ای را بر اساس دانش و تجربیات خود بر اساس اصطلاحات زبانی می‌کنند. نتایج ارزیابی این کارشناسان در مورد امکان وقوع رویدادهای پایه‌ای در یک جدول ثبت می‌شود. در ادامه یک عامل وزنی برای نشان دادن کیفیت نسبی کارشناسان مختلف معرفی می‌شود. در این پژوهش ضرایب وزن‌دهی کارشناسان بر اساس جدول ۳ تعیین می‌شوند. در نهایت ضریب وزنی هر کارشناس توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\text{Weighting factor of the expert} = \frac{\text{Weighting score of the expert}}{\text{Sum of weighting scores of all experts}} \qquad (۱)$$

جدول ۳: رتبه‌بندی وزن با توجه به ویژگی‌های کارشناسان

Item	Categories	Weight	Item	Categories	Weight
Education Level	Ph.D.	5	Professional Position	Professor	5
	Master	4		Vice-professor	4
	Bachelor	3		Engineer	3
	Associate	2		Technician	2
	Diploma	1		Worker	1
Age	>50	4	Work Experience	>30	5
	40-49	3		20-30	4
	30-39	2		10-20	3
	<30	1		5-10	2
				<5	1

از آنجا که کارشناسان از اصطلاحات زبانی برای قضاوت در مورد احتمال وقوع رویدادهای پایه‌ای استفاده کردند و با توجه به نظرات متفاوت آن‌ها، لازم است نظرها در یک نظر واحد ترکیب یا تجمیع شود. بنابراین باید از یک سیستم تقریب عددی برای تبدیل سیستماتیک اصطلاحات زبانی به اعداد فازی استفاده شود. روش‌های زیادی برای این منظور وجود دارد. یک رویکرد مرسوم در تجمیع اعداد فازی، استفاده از روش میانگین وزنی[۱] یا روش جمع-ضرب[۲] برای تجمیع نتایج ارزیابی مطابق رابطه زیر است [۳, ۱۶]:

$$M_i = \sum_{j=1}^{n} w_j A_{ij}\,, \qquad i = 1,2,\dots,m \qquad (۲)$$

که در آن A_{ij} عدد فازی متناظر با اصطلاح زبانی رویداد پایه‌ای iام است که توسط کارشناس jام ارزیابی شده است. m تعداد رویدادهای پایه‌ای و n تعداد کارشناسان است. w_j ضریب وزنی کارشناس jام است و M_i نشان دهنده عدد فازی تجمیعی مثلثی یا ذوزنقه‌ای متناظر با رویداد پایه‌ای iام است.

سپس به منظور استخراج مقدار احتمال رویدادهای پایه‌ای، اعداد فازی تجمیعی به دست آمده برای هر یک از رویدادهای پایه‌ای می‌بایست به یک مقدار واضح یا غیر فازی تبدیل شود، که این عدد به عنوان «امتیاز امکان فازی یا FPS[۳]» نامیده می‌شود. به منظور غیرفازی‌سازی[۴] در نظریه مجموعه‌های فازی و به دست آوردن یک نتیجه قابل سنجش، تکنیک‌های بسیاری در دسترس هستند. در میان آن‌ها، رویکرد «مرکز ناحیه یا CoA[۵]» محبوبیت

[۱] Weighted Average
[۲] Sum-Production Method
[۳] Fuzzy Possibility Score (FPS)
[۴] Defuzzification
[۵] Center of Area (CoA)

بیشتری دارد [۱۶]. با غیرفازی‌سازی تابع عضویت ذوزنقه‌ای $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ با استفاده از تکنیک CoA عدد واضح FPS به فرم زیر حاصل می‌شود:

$$FPS = \frac{1}{3}\frac{(a_4+a_3)^2 - a_4a_3 - (a_1+a_2)^2 + a_1a_2}{a_4+a_3-a_1-a_2} \quad (۳)$$

در درخت عیب، احتمال وقوع رویدادهای پایه‌ای اعداد دقیق هستند. بنابراین، نتایج به‌دست آمده در مرحله فازی‌زدایی باید از یک امکان به یک احتمال تبدیل شوند. در واقع امتیاز امکان فازی (FPS) باید به «احتمال خرابی فازی یا FFP» تبدیل شود. احتمال خرابی فازی برای هر یک از رویدادهای پایه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$FFP = \begin{cases} 1/10^k & FPS \neq 0 \\ 0 & FPS = 0' \end{cases} \quad (۴)$$
$$k = [(1 - FPS)/FPS]^{(1/3)} \times 2.301$$

که متغیر میانی k تابعی از FPS است.

بر اساس نتایج ارزیابی کارشناسان در مورد امکان وقوع رویدادهای پایه‌ای، ضریب وزنی هر کارشناس، عدد فازی تجمیعی و امتیاز امکان فازی در روابط قبل، نهایتاً احتمال وقوع هر یک از رویدادهای پایه‌ای در درخت عیب طراحی شده با استفاده از روش غیرفازی‌سازی CoA مطابق جدول ۴ به دست می‌آیند.

جدول ۴: احتمال وقوع رویدادهای پایه‌ای در درخت عیب فازی

Basic Events	Description	Fuzzy Failure Probability
BE_1	Manufacturing/Design Defects	0.0002
BE_2	Cyclic Thermal Loading	0.0008
BE_3	Flight Loads	0.0776
BE_4	Pressurization	0.0313
BE_5	Manufacturing/Fabrication/ Maintenance/Repair Defects	0.0047
BE_6	Low Oscillatory Relative Movement	0.0481
BE_7	Environmental Conditions	0.0056
BE_8	Coating/Paint Degradation	0.0037
BE_9	Thermal Environment	0.0005
BE_{10}	Mechanical Loading	0.0609
BE_{11}	Chemical Environmental	0.0024
BE_{12}	Sustain Loading	0.0038
BE_{13}	Monotonic Loading	0.0014
BE_{14}	Overloading	0.0056
BE_{15}	Wear/Erosion	0.0198
BE_{16}	Excess Deformation	0.0013

درخت عیب یک رویکرد کارآمد برای نمایش علل عیب و روابط بین رویدادهای نامطلوب ارائه می‌دهد. با این وجود، نمی‌تواند شواهد را مانند شبکه‌های بیزی (BNs) در استدلال وارد کند. از طرفی، درخت عیب در به‌روز رسانی ریسک در طول چرخه عمر فرآیند ناتوان است و وابستگی بین رویدادهای پایه‌ای را نادیده می‌گیرد. از این رو، در سال‌های اخیر، برای غلبه بر معایب و محدودیت‌های درخت عیب و انجام ارزیابی ریسک برای سناریوهای مختلف، تبدیل درخت عیب به شبکه بیزی متناظر پیشنهاد شده است [۱۷]. در این صورت، شبکه بیزی حاصل یک مدل کارآمد با ویژگی‌های منحصر به فرد جهت ارزیابی ریسک و تجزیه و تحلیل ایمنی فراهم می‌آورد. در بخش بعد نحوه توسعه مدل شبکه بیزی برای ارزیابی ریسک سازه هواپیمای مفروض ارائه شده است.

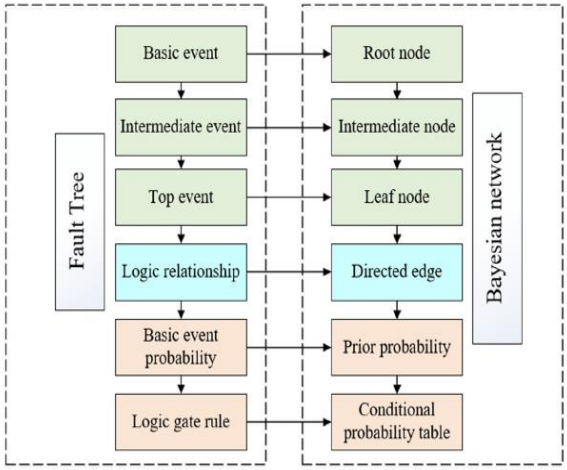
شبکه‌های بیزی

شبکه‌های بیزی ابزاری قدرتمند و انعطاف‌پذیر برای مدل‌سازی گرافیکی روابط متقابل علل و معلول بین برخی از متغیرها هستند. شبکه بیزی یک گراف غیرچرخه‌ای جهت‌دار[۲] است که شامل تعدادی گره[۳] و یال[۴] است. در شبکه بیزی، گره‌ها متغیرهای تصادفی را نشان می‌دهند که مربوط به رویدادهای یک سیستم هستند و یال‌های جهت‌دار بین دو گره نشان دهنده رابطه وابستگی بین رویدادها است. اگر دو گره توسط یک یال جهت‌دار به هم متصل شوند، گره ورودی، گره «والد» و گره خروجی، گره «فرزند» نامیده می‌شوند. گره‌هایی که هیچ گره ورودی دیگری ندارند، گره‌های ریشه[۷] نامیده می‌شوند و گره‌ای که هیچ گره خروجی ندارد را گره برگ[۸] می‌نامند. تمام گره‌های دیگر، گره‌های میانی[۹] نامیده می‌شوند. هر گره ریشه یک «جدول احتمال پیشین یا PPT[۱۰]» دارد که احتمال اولیه این گره‌ها را نشان می‌دهد. یک گره غیر ریشه یک «جدول احتمال شرطی یا CPT[۱۱]» دارد که توزیع احتمال شرطی آن گره را تحت ترکیب حالت‌های گره‌های والد نشان می‌دهد [۱۸].

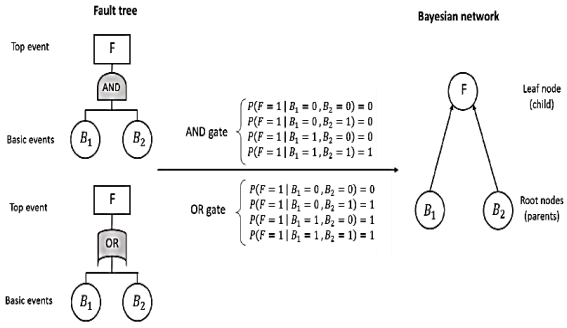
سناریوهای مختلف ارزیابی ریسک را می‌توان با تبدیل درخت عیب به شبکه بیزی با در نظر گرفتن رویداد راسی به عنوان گره برگ (Leaf Node) ارزیابی نمود. نحوه تبدیل درخت عیب به شبکه بیزی در شکل ۴ نشان داده شده است. در این تبدیل، رویدادهای درخت عیب به عنوان گره‌های شبکه بیزی در نظر گرفته می‌شوند. از طرفی، در درخت عیب از گیت‌های منطقی برای بیان روابط بین

[۱] Fuzzy Failure Probability (FFP)
[۲] Directed Acyclic Graph (DAG)
[۳] Node
[۴] Edge
[۵] Parent Node
[۶] Child Node
[۷] Root Nodes
[۸] Leaf Node
[۹] Intermediate Nodes
[۱۰] Prior Probability Table (PPT)
[۱۱] Conditional Probability Table (CPT)

رویدادهای مختلف استفاده می‌شود. تفاوت بین انواع گیت‌ها بر جداول احتمال شرطی تعریف شده بین گره‌های شبکه بیزی تأثیر می‌گذارد. نحوه تبدیل گیت‌های منطقی AND و OR در درخت عیب به جداول احتمال شرطی (CPT) در شبکه بیزی در شکل ۵ نشان داده شده است.

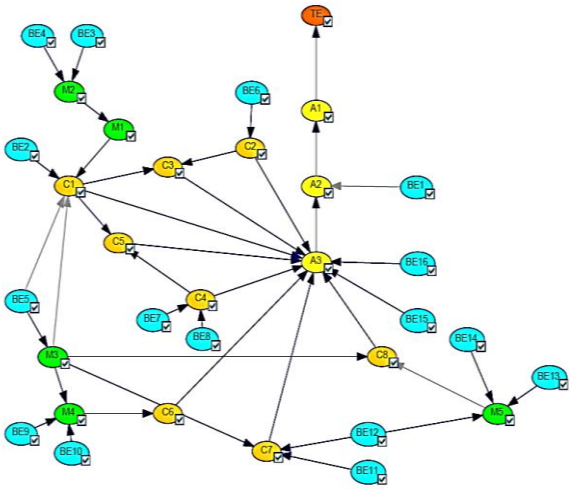


شکل ۴: نحوه تبدیل درخت عیب به شبکه بیزی [۱۹]



شکل ۵: تبدیل گیت‌های منطقی AND و OR در درخت عیب به جداول احتمال شرطی (CPT) در شبکه بیزی [۸]

در این مقاله، یادگیری شبکه بیزی بر اساس درخت عیب طراحی شده در بخش قبل، انجام می‌گیرد. در این حالت، ساختار شبکه بیزی از مدل درخت عیب پیشنهادی و جداول احتمال شرطی بر اساس گیت‌های منطقی متناظر در درخت عیب اقتباس شده است. در درخت عیب توسعه داده شده در بخش قبل، مطابق جدول ۱، ۱۶ رویداد پایه‌ای (BEs) وجود داشت که به ۱۶ گره ریشه، ۱۶ رویداد میانی به ۱۶ گره میانی و رویداد راسی به گره برگ در شبکه بیزی متناظر نگاشت می‌شوند. شکل ۶ مدل شبکه بیزی حاصل را جهت ارزیابی ریسک نمایش می‌دهد. تعریف پارامترهای شبکه بیزی مطابق جدول ۱ است.



شکل ۶: شبکه بیزی پیشنهادی برای ارزیابی ریسک

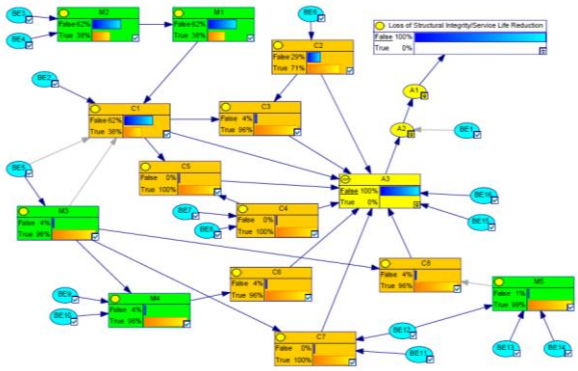
ارزیابی ریسک در شبکه بیزی طراحی شده

در شبکه‌های بیزی اطلاعات پیشین با استفاده از شواهد جدید، به صورت احتمالاتی به‌روز رسانی می‌شود. این شبکه از طریق به‌روز رسانی احتمالات هر گره بر اساس مشاهدات در هر بازرسی، قادر به تشخیص و یا پیش‌بینی خرابی‌های احتمالی و همچنین علل آن‌ها است. از این امر می‌توان جهت تشخیص عوامل ایجاد خرابی و همچنین پیش‌بینی وقوع خرابی جهت ارزیابی ریسک استفاده نمود. در این راستا، در ادامه دو سناریو مختلف بررسی می‌شود.

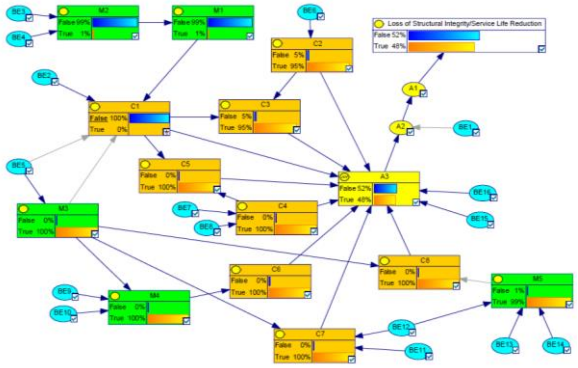
در سناریو اول، به منظور تشخیص احتمالاتی عوامل ایجاد خرابی، فرض می‌شود که «گره برگ» در شبکه بیزی مشاهده شده است. با جایگذاری TE=100% به عنوان مشاهده[۱] در شبکه بیزی پیشنهادی، احتمال وقوع رویدادهای پایه‌ای در شبکه بیزی به‌روز رسانی می‌شود. نتایج حاصل از ارزیابی ریسک در سناریو اول در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق این شکل، عامل‌های اصلی چنین رویدادی حالت‌های خرابی «C_1: Fatigue» با احتمال ۶۲٪ و «C_2: Fretting» با احتمال ۲۹٪ هستند.

در سناریو دوم، پیش‌بینی درصد احتمال خرابی در اثر مشاهده حالت خرابی خستگی یا «C_1: Fatigue» و ارزیابی ریسک مربوطه بررسی شده است. خستگی یکی از مهم‌ترین حالت‌های خرابی برای سازه هواپیما است [۲۰]. نتایج حاصل از شبکه بیزی با مشاهده حالت خرابی «C_1: Fatigue» در شکل ۸ نشان داده شده است. در این حالت، ریسک وقوع رویداد راسی یا گره برگ در شبکه بیزی برابر ۵۲٪ به دست می‌آید.

[۱] Evidence



شکل ۷: ارزیابی ریسک بر اساس شبکه بیزی (سناریو تشخیص)



شکل ۸: ارزیابی ریسک بر اساس شبکه بیزی (سناریو پیش‌بینی)

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله مدلی برای ارزیابی ریسک و بررسی ایمنی سازه یک هواپیما با استفاده از رویکرد آنالیز درخت عیب فازی و شبکه بیزی ارائه گردید. با به‌کارگیری آنالیز درخت عیب فازی، انواع حالت‌های آسیب و علل بروز آسیب از طریق تحلیل کیفی بررسی و سپس اثرات آسیب‌ها در یک ساختار درختی و به طور سیستماتیک تجزیه و تحلیل شدند. از این رو می‌توان از آن به عنوان ابزاری تشخیصی برای شناسایی و اصلاح علل ایجاد آسیب با هدف مدیریت آن‌ها استفاده نمود. مدل شبکه بیزی توسعه داده شده می‌تواند برای ارزیابی و مدیریت ریسک جهت تصمیم‌گیری‌های مهم در مورد فواصل بازرسی، انتخاب تکنیک‌های بازرسی غیرمخرب مناسب و تعیین ماموریت‌ها و پارامترهای پرواز استفاده شود.

مراجع

[1] E. J. Tuegel, R. P. Bell, A. P. Berens, T. Brussat, J. W. Cardinal, J. P. Gallagher, and J. Rudd, "Aircraft Structural Reliability and Risk Analysis Handbook, Volume 1: Basic Analysis Methods (Revised)," Structures Technology Branch (AFRL/RQVS), Aerospace Vehicles Division Wright, 2018.

[2] R. Torregosa and W. Hu, "Probabilistic risk analysis of fracture of aircraft structures using a Bayesian approach to update the distribution of the equivalent initial flaw sizes," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 36, pp. 1092-1101, 2013.

[3] D. Yuhua and Y. Datao, "Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis," *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 18, pp. 83-88, 2005.

[4] X. Li, Y. Zhang, R. Abbassi, F. Khan, and G. Chen, "Probabilistic fatigue failure assessment of free spanning subsea pipeline using dynamic Bayesian network," *Ocean Engineering*, vol. 234, p. 109323, 2021.

[5] E. Ruijters and M. Stoelinga, "Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools," *Computer science review*, vol. 15, pp. 29-62, 2015.

[6] M. Yazdi, J. Mohammadpour, H. Li, H. Z. Huang, E. Zarei, R. G. Pirbalouti, and S. Adumene, "Fault tree analysis improvements: A bibliometric analysis and literature review," *Quality and Reliability Engineering International*, 2023.

[7] N. Fenton and M. Neil, *Risk assessment and decision analysis with Bayesian networks*: Crc Press, 2018.

[8] A. M. Mirhosseini, S. Adib Nazari, A. Maghsoud Pour, S. Etemadi Haghighi, and M. Zareh, "Probabilistic failure analysis of hot gas path in a heavy-duty gas turbine using Bayesian networks," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 10, pp. 1173-1185, 2019.

[9] R.x. Duan and H.l. Zhou, "A new fault diagnosis method based on fault tree and Bayesian networks," *Energy Procedia*, vol. 17, pp. 1376-1382, 2012.

[10] G. Xinyao, M. Bin, L. Yawei, L. Na, F. Shuai, and S. Qingmin, "A human error mechanism for pilot based on fault tree analysis and Bayesian network," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 38, pp. 6863-6871, 2020.

[11] Y. A. Mahmood, A. Ahmadi, A. K. Verma, A. Srividya, and U. Kumar, "Fuzzy fault tree analysis: a review of concept and application," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 4, pp. 19-32, 2013.

[12] P. White, "Review of methods and approaches for the structural risk assessment of aircraft," Defence Science And Technology Organisation Victoria (Australia) Air, 2006.

[13] S. Aerospace, "ARP4761. Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment," *SAE International, Warrendale*, 1996.

[14] M. Stamatelatos, W. Vesely, J. Dugan, J. Fragola, J. Minarick, and J. Railsback, "Fault tree handbook with aerospace applications," 2002.

[15] H. Soltanali, M. Khojastehpour, J.T. Farinha, and J.E.D.A.E. Pais, "An integrated fuzzy fault tree model with Bayesian Network-Based maintenance optimization of complex equipment in automotive manufacturing," *Energies*, vol. 14, p. 7758, 2021.

[16] M. Yazdi and E. Zarei, "Uncertainty handling in the safety risk analysis: an integrated approach based on fuzzy fault tree analysis," *Journal of failure analysis and prevention*, vol. 18, pp. 392-404, 2018.

[17] A. Bobbio, L. Portinale, M. Minichino, and E. Ciancamerla, "Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 71, pp. 249-260, 2001.

[18] Y.F. Li, J. Mi, Y. Liu, Y.J. Yang, and H.Z. Huang, "Dynamic fault tree analysis based on continuous-time Bayesian networks under fuzzy numbers," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 229, pp. 530-541, 2015.

[19] L. Yunpeng, W. Shen, L. Qian, and L. Dongpeng, "Failure Risk Assessment of Coal Gasifier Based on the Integration of Bayesian Network and Trapezoidal Intuitionistic Fuzzy Number-Based Similarity Aggregation Method (TpIFN-SAM)," *Processes*, vol. 10, p. 1863, 2022.

[20] S. Findlay and N. Harrison, "Why aircraft fail," *Materials today*, vol. 5, pp. 18-25, 2002.