نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و ششم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۳

به‌کارگیری مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی جهت ارزیابی مؤلفه‌های فنی مؤثر در ایمنی هوانوردی

محمدرضا مروی‌نام*[۱]

۱- استادیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰)

چکیده

ایمنی هوانوردی همواره یکی از موضوعات مهم و مورد توجه در صنعت حمل‌ونقل هوایی بوده است. از زمان نخستین پرواز بشر، حوادث و سوانح هوایی در سراسر جهان منجر به شکل‌گیری تلاش‌های گسترده‌ای برای بهبود ایمنی پروازها شده است. شناسایی عوامل مؤثر در بروز این حوادث و تحلیل دقیق آن‌ها می‌تواند به کاهش سوانح و افزایش ایمنی پروازها کمک شایانی نماید. در این راستا، مدل‌ها و نظریه‌های متعددی برای ارزیابی عوامل تأثیرگذار بر ایمنی هوانوردی توسعه یافته‌اند. در مواردی که داده‌های تاریخی کافی در دسترس نباشد، استفاده از منطق فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، در ترکیب با نظرات خبرگان، می‌تواند جایگزین مناسبی برای ارزیابی عوامل فنی مؤثر در ایمنی هوانوردی باشد.این تحقیق با بهره‌گیری از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی(FAHP) ، به ارزیابی مؤلفه‌های فنی مؤثر در ایمنی هوانوردی پرداخته است. برای این منظور، از تقسیم‌بندی پنج‌گانه شورای بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی (IATA) شامل عوامل انسانی، فنی، محیطی، سازمانی و اطلاعات ناقص به‌عنوان معیارهای اصلی و ۳۶ زیرمعیار استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که تحلیل سلسله‌مراتبی فازی در مقایسه با مدل سلسله‌مراتبی سنتی، دقت بالاتری در ارزیابی عوامل فنی ایمنی هوانوردی دارد. به‌طور خاص، یافته‌ها حاکی از آن است که عوامل فنی و انسانی بالاترین وزن را در میان سایر معیارها به خود اختصاص داده‌اند. یکی دیگر از نتایج مهم این تحقیق، تأثیر بالای اطلاعات ناقص در کاهش سطح ایمنی هوانوردی است. عدم دسترسی به داده‌های کامل و به‌روز می‌تواند روند تصمیم‌گیری را تحت تأثیر قرار دهد و به بروز خطرات بیشتری منجر شود. به‌کارگیری مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به سازمان‌های هواپیمایی این امکان را می‌دهد که بر روی عوامل کلیدی تمرکز کنند و با اولویت‌بندی دقیق، برنامه‌های مؤثری برای بهبود ایمنی پیاده‌سازی نمایند.

واژه‌های کلیدی: *ایمنی هوانوردی - عوامل فنی – AHP – منطق فازی*

Deployment of Hierarchical fuzzy model to evaluate the technical factors affecting aviation safety

mohammad reza marvinam

Abstract

Aviation Safety has always been one of the key and important topics in the aviation industry. Since the first human flight, aviation accidents and incidents worldwide have led to extensive efforts to improve flight safety. Identifying the factors contributing to these accidents and accurately analyzing them can greatly assist in reducing incidents and enhancing flight safety. In this regard, various models and theories have been developed to assess the factors influencing aviation safety. When sufficient historical data is unavailable, using fuzzy logic and fuzzy analytical hierarchy process (FAHP), in combination with expert opinions, can be an appropriate alternative for evaluating the technical factors affecting aviation safety. This study employs the fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) to evaluate the technical components influencing aviation safety. For this purpose, the five-part classification from the International Air Transport Association (IATA), including human, technical, environmental, organizational, and incomplete information factors, was used as the main criteria, with 36 sub-criteria. Specifically, the findings show that technical and human factors hold the highest weight among the other criteria. another significant finding of this study is the high impact of incomplete information on reducing aviation safety levels. The lack of access to complete and up-to-date data can affect decision-making processes and lead to increased risks. By employing FAHP, aviation organizations can focus on key factors and implement effective safety improvement programs through precise prioritization.

Key words: *Aviation Safety, technical factors, AHP, fuzzy logic*

* نویسنده پاسخگو: محمدرضا مروی‌نام، تلفن: ۰۲۱۶۶۶۹۳۴۴۲، پست الکترونیک: mohammadrezamarvinam@gmail.com

این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس از آدرس https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمایید.

مقدمه

از زمان نخستین پروازهای بشر، سوانح و حوادث هوایی در نقاط مختلف جهان، اهمیت ایمنی هوانوردی را مطرح ساخته‌اند. این مسئله، بیش از یک قرن تلاش مستمر بشر را در جهت بهبود و ارتقاء سطح ایمنی پروازها در صنعت هوانوردی به دنبال داشته است [۱]. یکی از مهم‌ترین موضوعات در این حوزه، شناسایی و تحلیل دقیق عوامل مؤثر بر بروز این سوانح و رویدادهای هوایی است تا بتوان از طریق این تحلیل‌ها، میزان وقوع حوادث را کاهش داده و ایمنی پروازها را افزایش داد [۱].

در ارزیابی تأثیر عوامل مختلف بر ایمنی هوانوردی، مدل‌ها و نظریه‌های متعددی به کار گرفته شده است. بسیاری از این مدل‌ها مبتنی بر داده‌های بانک‌های اطلاعاتی هستند که اطلاعات مربوط به سوانح و حوادث را تحلیل می‌کنند. اما در مواردی که دسترسی به بانک‌های اطلاعاتی محدود یا غیرممکن است، از رویکردهای مبتنی بر منطق فازی و ترکیب آن با نظرات خبرگان استفاده می‌شود تا بتوان به نتایجی کاربردی دست یافت [۲].

سامانه‌های ارزیابی ایمنی هوانوردی یکی از ابزارهای پیشگیرانه برای اطمینان از سلامت و ایمنی پروازها به شمار می‌آیند. این سامانه‌ها با شناسایی خطرات و آسیب‌های احتمالی، اولویت‌بندی و ارزیابی تأثیرگذاری آن‌ها و همچنین نظارت و مدیریت مخاطرات، به ارتقای ایمنی کمک می‌کنند [۳]. این ابزارها امکان برنامه‌ریزی مؤثر، تدوین مقررات الزام‌آور و آموزش نیروی انسانی متخصص را فراهم می‌سازند تا صنعت هوانوردی به سطح بالاتری از ایمنی دست یابد [۲].

در این میان، عوامل فنی یکی از مؤثرترین مؤلفه‌های تأثیرگذار بر ایمنی هوانوردی محسوب می‌شوند. سؤال‌های کلیدی این تحقیق عبارت‌اند از: ۱) چه تفاوت‌هایی در نتایج تحلیل عوامل فنی با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی وجود دارد؟ و ۲) چگونه می‌توان از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی در ارزیابی مؤلفه‌های فنی مؤثر بر ایمنی هوانوردی استفاده کرد؟

برای دستیابی به اهداف این تحقیق، از تقسیم‌بندی پنج‌گانه شورای بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی شامل عوامل انسانی، فنی، محیطی، سازمانی و اطلاعات ناقص به‌عنوان معیارهای اصلی استفاده شده است. همچنین ۳۶ زیرمعیار مورد بررسی قرار گرفته و میزان اهمیت هرکدام از آن‌ها از طریق نظرسنجی از خبرگان تعیین شده است. سپس این معیارها در چارچوب دو مدل تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مورد ارزیابی و تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته‌اند [۴].

ایمنی هوانوردی و مدل‌های (تئوری) ارزیابی

فعالیت‌های کلیدی سامانه ارزیابی ایمنی را می‌توان در ایجاد تشکیلات (عمدتاً در روند به وجود آوردن فرهنگ و دانش ایمنی)، تعیین خط‌مشی و اهداف (شامل تعیین مسئولیت‌ها، انتخاب کارکنان کلیدی و تعیین شرح وظایف آن‌ها در قبال ایمنی، طراحی و اجرای سامانه و مستندسازی) خلاصه کرد. همچنین، شناسایی خطرات از طریق بررسی ایمنی، بازرسی عملیات پروازی، ارزیابی ایمنی با تجزیه‌وتحلیل اطلاعات، بازرسی تجهیزات، امکانات، ماشین‌آلات، ابزار، رویه‌ها و فرآیندها از دیگر موارد کلیدی است [۵]. تضمین ایمنی شامل نظارت بر عملکرد ایمنی، بررسی و گزارش وضعیت ایمنی، بازرسی‌های ایمنی، مدیریت تغییرات و بازنگری‌ها می‌شود. همچنین، ارزیابی ایمنی از طریق تجزیه‌وتحلیل وقایع خطرساز و پیگیری آن‌ها، تجزیه‌وتحلیل شرایط غیر ایمن و کنترل عملکردها از طریق بازرسی‌های داخلی و روش‌مند انجام می‌شود [۶]. اولویت‌بندی خطرات نیز با ارزیابی فرایند مخاطره (ریسک)، شدت و احتمال وقوع خطر صورت می‌گیرد. در نهایت، ترویج ایمنی از طریق انتشار نتایج تحلیلی بررسی‌ها و ارائه گزارش‌های منظم و رسمی از رویدادها و سوانح انجام می‌پذیرد.

تضمین ایمنی نیز یکی دیگر از فعالیت‌های اصلی این سامانه است که از طریق نظارت بر عملکرد ایمنی، بررسی و گزارش وضعیت ایمنی و انجام بازرسی‌های منظم صورت می‌پذیرد. این بخش از فرآیند شامل مدیریت تغییرات در سازمان و اعمال بازنگری‌های دوره‌ای است تا اطمینان حاصل شود که تمامی جنبه‌های

ایمنی به‌روز و موثر هستند. ارزیابی مداوم شرایط ایمنی و کنترل عملکردها نیز از طریق بازرسی‌های داخلی و سیستماتیک انجام می‌شود تا هرگونه شرایط غیر ایمن شناسایی و اصلاح شود. یکی دیگر از جنبه‌های کلیدی سامانه ارزیابی ایمنی، اولویت‌بندی خطرات است. این فرآیند شامل ارزیابی میزان ریسک، شدت و احتمال وقوع خطر است [۱].

هدف اصلی از این فعالیت‌ها، شناسایی و کاهش ریسک‌های موجود در سیستم هوانوردی است. با استفاده از مدل‌های تحلیلی و بررسی داده‌های گذشته، سازمان‌ها قادر به شناسایی خطرات بالقوه هستند و می‌توانند اقدامات پیشگیرانه‌ای برای جلوگیری از وقوع سوانح اتخاذ کنند. یکی از فعالیت‌های مهم سامانه ارزیابی ایمنی، ترویج ایمنی است. این مرحله شامل انتشار نتایج تحلیل‌ها و بررسی‌های انجام شده است.

این نتایج به‌صورت رسمی و منظم به سازمان‌های هوانوردی و دیگر بخش‌های مرتبط گزارش می‌شود. ترویج ایمنی همچنین از طریق برگزاری کارگاه‌ها، جلسات آموزشی و اطلاع‌رسانی در مورد یافته‌های جدید انجام می‌شود. این اقدامات به بهبود فرهنگ ایمنی و افزایش آگاهی کارکنان هوانوردی کمک شایانی می‌کند.به علاوه، سامانه ارزیابی ایمنی از مدل‌های پیشرفته آماری و تحلیلی برای پیگیری تغییرات و به‌روزرسانی‌های مورد نیاز در روند ایمنی استفاده می‌کند. این مدل‌ها به‌خصوص در زمینه تحلیل ریسک و اولویت‌بندی خطرات موثر بوده و سازمان‌ها را قادر می‌سازند تا تصمیمات استراتژیک مناسبی اتخاذ کنند [۷].

چنین سیستم‌هایی به سازمان‌های هوانوردی این امکان را می‌دهند که با تحلیل جامع داده‌ها و اطلاعات، برنامه‌های ایمنی کارآمدتر و موثرتری را اجرا کنند. افزودن برنامه‌های آموزشی و فرهنگ‌سازی به عنوان بخشی از روند ترویج ایمنی نیز یکی از گام‌های مهم در کاهش خطرات احتمالی و بهبود ایمنی کلان است. این برنامه‌ها از طریق مشارکت فعال کارکنان و ایجاد ساختارهای مناسب می‌تواند به تقویت و تثبیت فرهنگ ایمنی کمک شایانی کند.

علیرغم وجود سامانه‌های ایمنی، میزان حوادث هوانوردی نشان می‌دهد که تعداد تلفات انسانی همچنان بالا باقی‌مانده است، هرچند که نرخ حوادث (تعداد سوانح در هر میلیون سفر هوایی) کاهش‌یافته است [۸]. این آمارها در شرایطی که تعداد حوادث کم است، نمی‌توانند گرایش‌های آتی را به‌خوبی نشان دهند. اصولاً تجزیه‌وتحلیل ایمنی پرواز را می‌توان در چارچوب تئوری به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول به موقعیت پس از حادثه مربوط می‌شود و بخش دوم کنترل مؤلفه‌های مرتبط با ایمنی هوانوردی پیش از وقوع حادثه را دربرمی‌گیرد [۹].

در برنامه‌های ارزیابی ایمنی هوانوردی، دو مرحله اصلی اتخاذ می‌شود. مرحله اول توصیف نحوه کنترل و مدیریت ایمنی است و مرحله دوم شامل به‌کارگیری تئوری‌های ریاضی برای ارزیابی ایمنی می‌شود. در بیشتر موارد، عامل انسانی یکی از مهم‌ترین عوامل در بروز حوادث به شمار می‌رود. آمارها نشان می‌دهند که حدود هفتاد درصد از حوادث هوایی مرتبط با عوامل انسانی است [۱]. برای بررسی دقیق‌تر، چندین تئوری پیشنهادشده‌اند که به‌طور خاص به حوادث و رویدادهای هوایی می‌پردازند:

- الف: مدل SHELL
- ب: تئوری پنیر سوئیسی
- پ: تئوری دومینو
- ت: قانون زنجیره خطا
- ث: تئوری مورفی
- ج: مدل سمنان [۲]

در اکثر این تحقیقات، تمرکز بر شناسایی و تحلیل خطاهای انسانی و اعتبار مدل‌های آن‌ها بوده است و تحقیق مستقلی در خصوص نقص‌های فنی به‌عنوان گروهی مؤثر به عمل نیامده است. ازاین‌رو، نیاز به بازنگری مستقل در بررسی ریسک‌های مربوط به کارکنان نگهداری و تعمیرات هواپیما در حوادث هوایی احساس می‌شود [۱۰].

برای شناسایی عوامل مؤثر در بروز سوانح هوایی، یک مدل مناسب که بتواند سنجش‌های دقیق را ارائه

دهد و به بهبود ایمنی هوانوردی کمک کند، ضروری است. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به‌عنوان یکی از ابزارهای تصمیم‌گیری در مدیریت ایمنی و سایر زمینه‌ها به‌کار گرفته شده است [۱۱]. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی با منطق فازی نتایج بهتری نسبت به مدل‌های کلاسیک تحلیل سلسله‌مراتبی به دست می‌دهد [۱۲].

وانگ و همکاران [۲] با نشان دادن وابستگی معیارها و استفاده از فیدبک، یک مدل تصمیم‌گیری مرکب را توسعه دادند. او و همکارانش نیز به‌منظور بهینه‌سازی محاسبات، مدل‌های تحلیل سلسله‌مراتبی را با تئوری مجموعه‌های فازی ترکیب کردند. برخی تحقیقات، ترکیب مدل تحلیل سلسله‌مراتبی با QFD را پیشنهاد کرده‌اند تا از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی برای شناسایی اولویت‌ها استفاده شود و QFD به تصمیم‌گیری در زمینه طراحی محصول کمک کند [۱۳]. این رویکرد در انتخاب روبات‌ها، ارزیابی محل امکانات و انتخاب فرایندهای تجهیز نیز اصلاحاتی را به همراه داشته است. چانگ و همکاران [۱۴] نیز مدل AHP فازی را برای مدیریت ایمنی در صنعت تعمیر و نگهداری هواپیما پیشنهاد کردند.

نتایج تحقیقات اخیر در زمینه ایمنی هوانوردی غیرنظامی نشان داده است که بهبود امنیت در این صنعت نیازمند توسعه یک مدل تخصصی است. این مدل باید توانایی ارزیابی دقیق عوامل مختلف تأثیرگذار بر امنیت را داشته باشد و به‌طور مؤثر در شناسایی ریسک‌ها و مدیریت آن‌ها عمل کند. نیاز فوری به چنین مدلی به دلیل پیچیدگی‌ها و تغییرات سریع در صنعت هوانوردی احساس می‌شود [۲]. افزایش تراکم پروازها، استفاده گسترده از فناوری‌های جدید و افزایش نیاز به مدیریت هوشمند مخاطرات همگی از عواملی هستند که توسعه چنین مدلی را ضروری می‌کنند. مدل‌های فعلی ممکن است قادر به پوشش تمام جزئیات و پیچیدگی‌های محیط هوانوردی امروز نباشند، ازاین‌رو، مدل‌های جدیدتر و تخصصی‌تر برای پیشگیری از سوانح ضروری هستند.

یکی از نیازهای اساسی در توسعه این مدل، داشتن شاخص‌های امنیتی دقیق و مرتبط با ریسک‌های هوانوردی است. مطالعات مربوط به شاخص‌های امنیت نشان داده است که هرچند برخی مدل‌های ریسک‌سنجی در صنایع دیگر به‌کار گرفته شده‌اند، صنعت هوانوردی به شاخص‌های خاص خود نیاز دارد. شاخص‌های ریسک باید بتوانند تمام ابعاد امنیتی شامل عوامل انسانی، فنی، محیطی، سازمانی و اطلاعات ناقص را پوشش دهند [۱۵]. همچنین، باید قابلیت اندازه‌گیری و ارزیابی دقیق این شاخص‌ها وجود داشته باشد تا سطح امنیت در نقاط مختلف صنعت هوانوردی به‌طور مستمر سنجیده شود و بهبود یابد.

شورای بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی به‌عنوان یکی از نهادهای اصلی در تنظیم مقررات و استانداردهای امنیتی هوانوردی، علل سوانح را به پنج دسته اصلی تقسیم کرده است. این دسته‌ها شامل عوامل انسانی، فنی، محیطی، سازمانی و اطلاعات ناقص هستند که هرکدام نقش حیاتی در بروز سوانح دارند [۷]. به‌عنوان مثال، عوامل انسانی شامل خطاهای مربوط به پرسنل پروازی و زمینی، عوامل فنی شامل نقص‌های تجهیزات و سیستم‌ها، و عوامل محیطی شامل شرایط آب‌وهوایی و محیط پرواز است. هریک از این دسته‌ها به زیرمجموعه‌هایی تقسیم می‌شوند که علل دقیق‌تر وقوع سوانح را مشخص می‌کنند.

با توجه به این طبقه‌بندی، مدل تخصصی پیشنهادی باید توانایی شناسایی و ارزیابی علل مختلف سوانح را داشته باشد. به‌عنوان‌مثال، شناسایی علل مربوط به خطاهای انسانی و ارائه راه‌حل‌هایی برای کاهش این خطاها باید یکی از بخش‌های مهم این مدل باشد. همچنین، ارزیابی دقیق خطرات فنی و محیطی که می‌توانند منجر به سوانح شوند، باید با استفاده از داده‌های جامع و تجزیه‌وتحلیل دقیق صورت گیرد. نهایتاً، اطلاعات ناقص و مشکلات سازمانی باید با شفافیت بیشتر در مدل لحاظ شوند تا بتوان ریسک‌ها را بهتر مدیریت و کنترل کرد.

علاوه بر این، مدل تخصصی باید توانایی به‌روزرسانی و تطبیق با تغییرات سریع صنعت هوانوردی را نیز داشته

باشد. صنعت هوانوردی به دلیل نوآوری های پیوسته در زمینه فناوری های جدید، با چالش های متنوعی مواجه است. ازاین‌رو، مدل های ارزیابی ایمنی باید پویا باشند و قابلیت ارزیابی تأثیر فناوری های جدید مانند سیستم های خودکار و ابزارهای پیشرفته کنترل پرواز را داشته باشند. به‌عنوان‌مثال، با افزایش استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین (پهپادها) و سیستم های پروازی هوشمند، مدل پیشنهادی باید توانایی شناسایی خطرات جدید و ایجاد راهکارهایی برای مدیریت آن‌ها را دارا باشد.

همچنین، مدل پیشنهادی باید قابلیت ارزیابی و بهینه سازی اقدامات پیشگیرانه و واکنش های سازمانی را داشته باشد. به این معنا که مدل باید بتواند به طور مداوم عملکرد سازمانی را بررسی کند و بازخورد لازم را برای بهبود فرآیندهای مرتبط با ایمنی ارائه دهد. این امر شامل مدیریت صحیح تیم های عملیاتی، اطمینان از اجرای مؤثر پروتکل‌های ایمنی، و همچنین ارزیابی کیفیت و کارایی تجهیزات و فرآیندهای نگهداری و تعمیرات است. توجه به این ابعاد از ارزیابی، به سازمان‌های هوانوردی کمک می‌کند تا در مواقع اضطراری و وقوع سوانح، واکنش‌های مناسب و سریعی را به اجرا بگذارند و از تکرار حوادث مشابه جلوگیری کنند.

با استفاده از طبقه‌بندی مؤلفه‌های فنی که توسط شورای بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی ارائه شده است، مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مقایسات دوبه‌دو برای ارزیابی مؤلفه‌های فنی بهره می‌برد. در همین حال، تابع کیفیت فازی با بهره‌گیری از دانش و تخصص کارشناسان، رابطه بین این مؤلفه‌ها را دسته‌بندی و ارزیابی می‌کند. با توجه به اهمیت بالای عوامل فنی در ایمنی هوانوردی، این مدل‌ها می‌توانند به‌طور مؤثری در شناسایی و انتخاب مؤلفه‌های کلیدی مؤثر در ایمنی به کار گرفته شوند [۱۶].

کاربرد تابع کیفیت فازی، که مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی را با ارزیابی اهمیت نسبی تکمیل می‌کند، یک مکانیزم قابل‌قبول برای سنجش همبستگی بین تمامی معیارها و زیرمعیارها فراهم می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه‌وتحلیل‌های این مدل‌ها می‌تواند به شرکت‌های هواپیمایی، کارورزان تعمیر و نگهداری و سیاست‌گذاران رسمی کمک کند تا برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های خود را در زمینه ایمنی هوانوردی بهبود بخشند [۱۷ و ۱۸].

جدول ۱: طبقه‌بندی‌های علت سانحه / رویداد زیر نظر شورای بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی[۸]

گروه	علت سانحه /رویداد
انسانی	عدم موفقیت عمدی تبحر مخاطره وابسته به طرز عمل و رویه ناتوانی (عدم صلاحیت) / خستگی
فنی	نقص ساختاری چرخ‌ها و تایر نقص سامانه هیدرولیک نقص شدید موتور، ناقص روشن شدن موتور گرمای بیش‌ازحد موتور/ نقص پروانه کنترل‌های پروازی خلبان خودکار الکترونیک طرح پروازی حریق، دود در کابین
محیطی	هواشناسی ATC/COM / ترافیک هوایی پرندگان / خسارت شی خارجی امکانات فرودگاهی کمک‌های ناوبری امنیت موارد دیگر
سازمانی	مدیریت ایمنی سامانه‌های آموزشی استانداردها و بازرسی عملیات کابین گروه عملیاتی فناوری و تجهیزات طرح‌ریزی عملیاتی مدیریت تغییر سامانه‌های انتخاب تعمیر و نگهداری محموله‌های خطرناک ارسال پیام موارد دیگر
اطلاعات ناقص	اطلاعات ناقص برای هرگونه طبقه‌بندی

تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

تحلیل سلسله‌مراتبی فازی یک روش موثر برای مدیریت تصمیمات پیچیده است که از طریق ایجاد یک چهارچوب منطقی در سه مرحله انجام می‌شود: ساخت زنجیره‌ای، تحلیل اولویت و بررسی توافق. یکی از مزایای اصلی این روش، توانایی آن در شناسایی میزان سازگاری و ناسازگاری در تصمیم‌گیری است. این روش که بر پایه ارزیابی چندمعیاری بنا شده، در سال ۱۹۸۰ توسط توماس ال. ساعتی معرفی شد و تاکنون در بسیاری از حوزه‌های علمی مختلف کاربردهای زیادی داشته است [۱۹].

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی با شناسایی و اولویت‌بندی عناصر تصمیم‌گیری آغاز می‌شود. این عناصر شامل اهداف، معیارها و گزینه‌های احتمالی هستند که در فرآیند اولویت‌بندی به کار گرفته می‌شوند. شناسایی این عناصر و روابط میان آن‌ها منجر به ایجاد یک ساختار سلسله‌مراتبی می‌شود که به‌عنوان فرآیند ساخت سلسله‌مراتبی شناخته می‌شود [۲۰].

ساختار سلسله‌مراتبی به دلیل توانایی آن در خلاصه‌سازی عناصر تصمیم‌گیری (معیارها و گزینه‌ها) در سطوح مختلف بسیار مهم است. بنابراین، اولین گام در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی ایجاد یک ساختار سلسله‌مراتبی از موضوع مورد بررسی است که در آن اهداف، معیارها و گزینه‌ها و روابط میان آن‌ها مشخص می‌شود. چهار مرحله بعدی شامل محاسبه وزن (ضرایب اهمیت) معیارها و زیرمعیارها، محاسبه وزن گزینه‌ها، محاسبه امتیاز نهایی گزینه‌ها و بررسی سازگاری منطقی قضاوت‌ها است [۲۱].

این مرحله که شامل ایجاد ساختار سلسله‌مراتبی برای موضوع مورد نظر است، بخش مهمی از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی به شمار می‌آید. در این مرحله، مسائل پیچیده از طریق تحلیل سلسله‌مراتبی به اجزای ساده‌تری تقسیم می‌شوند که با توانایی‌های ذهنی انسان سازگار باشند [۱۲]. به عبارت دیگر، تحلیل سلسله‌مراتبی، مسائل پیچیده را از طریق تجزیه به عناصر کوچک‌تر، که به‌صورت سلسله‌مراتبی با یکدیگر در ارتباط هستند و هدف اصلی مسئله را به سطوح پایین‌تر سلسله‌مراتب مرتبط می‌کند، به شکلی ساده‌تر درمی‌آورد.

در تحلیل سلسله‌مراتبی، عناصر هر سطح به‌صورت زوجی نسبت به عناصر سطح بالاتر مقایسه می‌شوند تا وزن نسبی آن‌ها به دست آید. سپس با استفاده از این وزن‌های نسبی، وزن نهایی هر گزینه محاسبه می‌شود. این مقایسات، میزان ارجحیت عناصر نسبت به یکدیگر را مشخص می‌کند. به‌منظور تعیین وزن نسبی پارامترهای اصلی، ابتدا برای هرکدام از آن‌ها ماتریس میانگین هندسی تشکیل می‌شود و سپس وزن نسبی هرکدام محاسبه می‌شود. در نهایت، وزن نهایی هر گزینه مشخص می‌گردد.

جدول ۲- میزان ارجحیت برای مقایسه‌های زوجی

مقدار عددی	ترجیح‌ها	
۱	ترجیح یکسان	Equally preference
۳	کمی مرجح	Moderately preference
۵	ترجیح بیشتر	Strongly preference
۷	ترجیح خیلی بیشتر	Strongly preference
۹	کاملاً مرجح	Extremely preference
۲و ۴و ۶و ۸	ترجیح‌ها بین فواصل فوق	

ساخت زنجیره‌ای با هدف ارزیابی معیارها $(A_i, i=1,2,\ldots,m)$ و $(I_j, j=1,2,\ldots,n)$ و با استفاده از مقایسات دوبه‌دو مبتنی بر دانش و قضاوت کارشناسان، برای تعیین اولویت معیارها و زیرمعیارها انجام می‌شود. همچنین، بررسی توافق نیز در این فرآیند لحاظ می‌شود تا درجه توافق میان کارشناسان مشخص شود. از این طریق، ارزیابی‌ها برای اولویت‌بندی معیارها و زیرمعیارها ترکیب می‌شوند [۲۲].

در ساختار زنجیره‌ای مرتبط با ارزیابی ایمنی هوانوردی، مدل تحلیل سلسله‌مراتبی به‌عنوان یکی از ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاری، برای ارزیابی دوازده عامل فنی که توسط شورای بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی شناسایی شده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل به‌طور خاص طراحی شده است تا عوامل مختلف تأثیرگذار بر ایمنی هوانوردی را به‌صورت سیستماتیک شناسایی و دسته‌بندی کند. تحلیل سلسله‌مراتبی به این

دلیل استفاده می‌شود که می‌تواند عوامل پیچیده را به سطوح کوچک‌تر تقسیم کند و با ارزیابی آن‌ها به‌صورت زوجی، اولویت‌بندی را انجام دهد. این روش از آن جهت مهم است که به سازمان‌ها و متخصصان ایمنی هوانوردی کمک می‌کند تا تصمیمات دقیق‌تری در زمینه ایمنی اتخاذ کنند [۲۰].

این دوازده عامل فنی که توسط شورای بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی تعیین شده‌اند، شامل عواملی مانند طراحی تجهیزات، نگهداری، فناوری‌های به‌کاررفته در هواپیما و حتی عملکرد پرسنل فنی می‌شود. با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی ، هر یک از این عوامل به‌طور جداگانه در برابر سایر عوامل مقایسه و ارزیابی می‌شوند. این مقایسات به‌صورت زوجی انجام شده و وزن نسبی هر عامل بر اساس میزان تأثیر آن بر ایمنی هوانوردی محاسبه می‌شود. در این مدل، عواملی که تأثیر بیشتری بر ایمنی دارند، در اولویت بالاتری قرار می‌گیرند، که این امر به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا در مدیریت ایمنی، تمرکز بیشتری بر آن عوامل داشته باشند [۷] پس از تعیین وزن نسبی هر عامل، مدل AHP به کار می‌رود تا این نتایج به تصمیمات اجرایی تبدیل شوند. این تصمیمات شامل اعمال تغییرات فنی، بهبود فرآیندهای نگهداری و ارتقاء فناوری‌های مرتبط با ایمنی هواپیما است. با استفاده از این مدل، سازمان‌های هواپیمایی می‌توانند اقدامات مشخصی برای بهبود ایمنی انجام دهند که بر اساس داده‌های تخصصی و علمی بنا شده‌اند. این روش به‌ویژه در صنعت هوانوردی بسیار مفید است، زیرا ایمنی یکی از اولویت‌های اصلی در این صنعت است و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی به‌عنوان ابزاری دقیق برای مدیریت این جنبه مهم به کار گرفته می‌شود .

در نهایت، استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی در ارزیابی ایمنی هوانوردی نشان می‌دهد که این مدل نه‌تنها به‌عنوان ابزاری برای شناسایی عوامل فنی مؤثر عمل می‌کند، بلکه به تجزیه و تحلیل چگونگی تأثیر این عوامل بر یکدیگر و ایمنی کلی هوانوردی کمک می‌کند. ازاین‌رو، مدل تحلیل سلسله‌مراتبی به‌عنوان یکی از روش‌های استاندارد و معتبر برای ارزیابی ایمنی هوانوردی شناخته می‌شود و می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌های سازمان‌ها در این حوزه کمک کند [۲۳ و ۲۴].

در آنالیز اولویت‌بندی، بازه‌های قضاوت کارشناسان از ۱ تا ۹ تغییر می‌کند، بطوریکه $\{9,7,5,3,1\}$ به ترتیب مطابق با: اهمیت بسیار شدیدتر، بسیار زیاد، زیاد، متوسط، برابر است و $\{8,6,4,2\}$ مربوط به مقدار متوسط به هر مقایسه دوبه‌دو داده می‌شود، ما برای یک جفت معیار Ai و Aj، با استفاده از $I_{ij}=1,2,\ldots,n,a,I_{ji}$ یک رأی واجدالشرایط تعریف می‌کنیم اهمیت نسبی n معیار به‌عنوان یک ماتریس n به n سنجیده می‌شود.

جدول شماره ۳: شاخص تصادفی بودن R.I

N	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	۰	۰	/۵۸ ۰	/۹ ۰	/۱۲ ۱	/۲۴ ۱	/۳۲ ۱	/۴۱ ۱	/۴۵ ۱	/۵۱ ۱

بطوریکه $R= 0,00,\ldots,1/57$ و 1/59 برای رتبه n=1-15 ماتریس، بررسی توافق پذیرفتنی است.

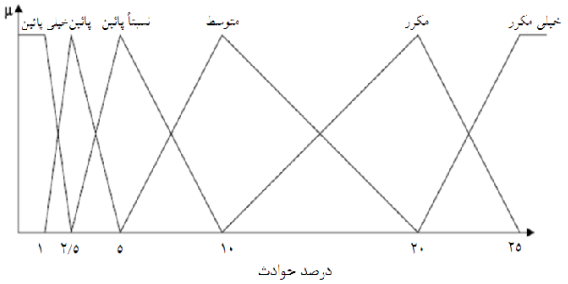
منطق فازی:

منطق فازی به دلیل توانایی‌اش در برخورد با عدم قطعیت و ابهام، در بسیاری از حوزه‌های علمی و مهندسی، ازجمله هوانوردی، به‌طور گسترده به کار گرفته شده است. یکی از اصلی‌ترین کاربردهای منطق فازی در این صنعت، تحلیل و مدیریت ریسک است. در محیط‌های پرخطر مانند هوانوردی، تصمیم‌گیری‌های دقیق و سریع بسیار حیاتی هستند، اما اطلاعات موجود همواره قطعی و کامل نیستند. در چنین شرایطی، منطق فازی به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با استفاده از اطلاعات ناقص و مبهم، به نتایج قابل‌اعتمادی دست یابند [۱۱]. این رویکرد، به‌ویژه زمانی که نیاز به تحلیل شرایط متغیر یا غیرقابل‌پیش‌بینی وجود دارد، بسیار مفید است.

یکی دیگر از کاربردهای منطق فازی در هوانوردی، ارزیابی ایمنی سیستم‌ها و تجهیزات است. برای مثال، ارزیابی وضعیت تجهیزات فنی هواپیماها یا سیستم‌های کنترل ترافیک هوایی معمولاً با ابهامات زیادی همراه است. استفاده از منطق فازی در این ارزیابی‌ها می‌تواند به

مهندسان و متخصصان کمک کند تا با دقت بیشتری به تحلیل وضعیت موجود بپردازند و تصمیمات مؤثرتری بگیرند [۱۲].

این رویکرد به آن‌ها امکان می‌دهد تا به‌جای وابستگی به داده‌های قطعی، از طیفی از داده‌ها و اطلاعات استفاده کنند که به آن‌ها اجازه می‌دهد شرایط را با دقت بیشتری ارزیابی کنند.



شکل ۱- تعاریف احتمال وقوع حوادث به‌صورت فازی

منطق فازی همچنین در مدیریت منابع انسانی هوانوردی نقش کلیدی دارد. برای مثال، ارزیابی عملکرد خلبانان، کنترل‌کنندگان ترافیک هوایی و دیگر کارکنان می‌تواند بر اساس پارامترهایی انجام شود که لزوماً به‌صورت عددی قابل‌بیان نیستند. معیارهایی مانند تجربه، واکنش به شرایط اضطراری یا مهارت‌های ارتباطی ممکن است به‌صورت دقیق قابل اندازه‌گیری نباشند، اما می‌توان آن‌ها را با استفاده از روش‌های فازی ارزیابی کرد. این امر به مدیریت هوانوردی امکان می‌دهد تا از تحلیل‌های کیفی نیز برای بهبود عملکرد کارکنان استفاده کند.

علاوه بر این، منطق فازی می تواند در فرآیند استخدام و ارتقاء کارکنان هوانوردی نیز به کار گرفته شود. در این زمینه، تصمیم‌گیری‌های مربوط به انتخاب خلبانان جدید، کنترل‌کنندگان ترافیک هوایی و دیگر کارکنان فنی معمولاً نیاز به ارزیابی معیارهای متنوعی دارد که بسیاری از آن‌ها به‌طور قطعی قابل اندازه‌گیری نیستند. به‌عنوان‌مثال، مهارت‌های بین فردی، توانایی‌های تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی و میزان سازگاری با تیم‌های چندوظیفه‌ای از جمله پارامترهایی هستند که با استفاده از منطق فازی می‌توان به‌صورت دقیق‌تری ارزیابی و رتبه‌بندی کرد. این امر به سازمان‌های هوانوردی کمک می کند تا با دقت بیشتری نیروهای مناسب را انتخاب کرده و در موقعیت‌های حساس از آن‌ها استفاده کنند.

منطق فازی همچنین در زمینه بهبود فرآیندهای آموزشی کارکنان هوانوردی نقشی اساسی ایفا می کند. بسیاری از جنبه‌های آموزش هوانوردی، به‌ویژه در بخش‌هایی که به تصمیم‌گیری سریع و دقیق نیاز است، نیاز به ارزیابی های کیفی دارند. با استفاده از منطق فازی، می‌توان اثربخشی دوره‌های آموزشی را سنجید و پارامترهایی مانند میزان تسلط کارکنان بر مباحث آموزشی یا توانایی آن‌ها در واکنش به موقعیت‌های شبیه‌سازی‌شده را تحلیل کرد. این اطلاعات می‌تواند برای بهبود برنامه‌های آموزشی و توسعه مهارت‌های کارکنان به کار رود و به این ترتیب سطح آمادگی آن ها برای مقابله با شرایط مختلف ارتقا یابد. منطق فازی می تواند در مدیریت ریسک‌های انسانی و روان‌شناختی کارکنان هوانوردی نیز مورد استفاده قرار گیرد. خستگی، استرس و فشارهای روحی می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد کارکنان در موقعیت‌های بحرانی تأثیر بگذارند. با استفاده از سیستم‌های فازی، می‌توان شرایط روحی و روانی کارکنان را ارزیابی کرده و میزان ریسک ناشی از عوامل انسانی را تخمین زد. این ارزیابی‌ها به مدیران هوانوردی کمک می‌کند تا برنامه‌های مدیریت استرس و بهبود وضعیت روانی کارکنان را به‌طور موثرتری پیاده‌سازی کنند و درنتیجه سطح ایمنی در صنعت هوانوردی را ارتقا دهند [۱۲].

منطق فازی در تصمیم‌گیری‌های راهبردی هوانوردی نیز به کار گرفته می‌شود. برای مثال، در فرآیند انتخاب مسیرهای جدید پروازی یا طراحی سیستم‌های امنیتی جدید، استفاده از منطق فازی به مدیران این صنعت کمک می‌کند تا با اطلاعات ناقص و غیرقطعی تصمیم‌گیری کنند.

جدول ۴: تابع عضویت اعداد فازی مثلثی

عدد گرد	عدد فازی مثلثی
۱=۱,۱,۳	۱
۳=۱,۳,۵	۳
۵=۳,۵,۷	۵
۷=۵,۷,۹	۷
۹=۷,۹,۹	۹
مقادیر میانگین بین مقادیر مقیاس نزدیک	۲و ۴و ۶و ۸

جدول ۵: قوانین فازی مربوط به ارزیابی مؤلفه‌های فنی در ایمنی هوانوردی

بدنه هواپیما/سامانه					نقص ساختاری
M	M	L	VL	VL	
M	M	L	VL	VL	VL
M	M	L	L	VL	L
H	H	M	L	L	M
VH	H	H	M	M	H
VH	VH	H	M	M	WH

این توانایی منطق فازی در تحلیل داده‌های مبهم و ارائه نتایج دقیق، یکی از دلایل اصلی محبوبیت آن در صنعت هوانوردی است. با توجه به اهمیت بالای ایمنی در هوانوردی، استفاده از روش‌های نوین مانند منطق فازی برای ارتقای فرآیندهای تصمیم‌گیری و مدیریت ریسک ضروری به نظر می‌رسد [۱۹].

به‌منظور اجرای این ترسیم از مجموعه‌های فازی هر شکل از قبیل مثلثی، گاوسی و غیره می‌توانیم استفاده کنیم. در این مقاله، اعداد فازی مثلثی ۹=۱ برای اصلاح طرح مقیاس بندی بکار برده شده‌اند. به‌منظور در نظر گرفتن عدم دقت ارزیابی‌های کیفی انسانی، پنج عدد فازی به همراه تابع‌های عضویت مربوطه همان‌طور که در جدول **۴** نشان داده‌شده است تعریف می‌شوند، یک مبنای قانون فازی، مجموعه‌ای از قوانین فازی R را دربرمی گیرد.

نوع تحقیق و ابزار مطالعه

تحقیق حاضر از نوع توصیفی-تحلیلی است و از روش موردی-زمینه‌ای بهره می‌گیرد. ازنظر نوع استفاده، این تحقیق کاربردی بوده و به‌منظور بررسی و تحلیل عوامل مؤثر بر ایمنی هوانوردی و سوانح هوایی انجام شده است. گردآوری داده‌ها از طریق مراجعه به اسناد و مدارک معتبر و همچنین پرسش‌نامه‌های تخصصی انجام گرفته است. جامعه آماری این تحقیق شامل ۵۹ نفر از کارشناسان ایمنی و متخصصان بررسی سوانح هوایی است که با استفاده از روش نمونه‌گیری غیر احتمالی هدفمند انتخاب شده‌اند. این روش به‌ویژه به دلیل دسترسی به افراد متخصص و باتجربه در حوزه ایمنی هوانوردی به کار گرفته شده است.

برای اطمینان از دقت و قابلیت اعتماد ابزارهای جمع‌آوری داده، از آزمون آلفای کرونباخ استفاده شده است. نتایج این آزمون نشان می‌دهد که پایایی ابزار تحقیق ۹۱ درصد است، که بیانگر سطح بالای اطمینان‌پذیری و دقت پرسش‌نامه‌ها در سنجش معیارهای مربوطه می‌باشد. علاوه بر این، برای ارزیابی روایی پرسش‌نامه‌ها، یک نسخه اولیه تهیه شده و پس از توزیع آن بین ۴ نفر از کارشناسان حوزه ایمنی هوانوردی، اصلاحات لازم انجام گرفته است. سپس، نسخه نهایی پرسش‌نامه در اختیار نمونه آماری قرار گرفت تا پاسخ‌های موردنیاز جمع‌آوری شود.

در ادامه، ضریب آلفای کرونباخ برای بررسی نهایی پایایی تحقیق محاسبه شد که عدد ۰/۹۴ به‌دست آمد. این عدد نشان‌دهنده پایایی بسیار بالای پرسش‌نامه تحقیق است که به اعتبار و قابلیت اتکای یافته‌های این تحقیق کمک می‌کند. این سطح از پایایی تضمین می‌کند که نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل داده‌ها قابل اعتماد هستند و می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مربوط به ایمنی هوانوردی استفاده شوند.

ابزار مطالعه و روش‌های تکمیلی

علاوه بر پرسش‌نامه‌های اصلی، داده‌های تکمیلی از طریق مراجعه به منابع ثانویه مانند گزارش‌های سوانح هوایی و اسناد مرتبط با استانداردهای ایمنی هوانوردی نیز گردآوری شده است. این منابع به محققان کمک کرده است تا زمینه‌های موجود در داده‌های کیفی و کمی را بررسی کنند و نتایج دقیق‌تری از تحقیق به دست آورند. استفاده از منابع ثانویه به‌ویژه در حوزه‌های

پیچیده‌ای مانند ایمنی هوانوردی اهمیت دارد، چراکه این حوزه‌ها به داده‌های چندبعدی و معتبر نیاز دارند.

برای افزایش دقت تحلیل‌ها، داده‌های به‌دست‌آمده از پرسش‌نامه‌ها با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته تجزیه‌وتحلیل شدند. از جمله این روش‌ها می‌توان به تحلیل‌های همبستگی و تحلیل رگرسیون اشاره کرد که به محققان کمک کردند تا روابط میان متغیرها را شناسایی و اثرات آن‌ها را بررسی کنند. این روش‌ها همچنین امکان شناسایی عوامل مؤثر در بروز سوانح و مشکلات ایمنی در هوانوردی را فراهم آوردند، که می‌تواند به توسعه مدل‌های بهبود ایمنی کمک کند.

این تحقیق با بهره‌گیری از یک رویکرد توصیفی-تحلیلی و ابزارهای دقیق جمع‌آوری داده، به تحلیل عوامل مختلفی پرداخته است که بر ایمنی هوانوردی تأثیر می‌گذارند. با توجه به پایایی بالای ابزارهای تحقیق و روش‌های آماری مورد استفاده، نتایج به‌دست‌آمده از اعتبار بالایی برخوردارند و می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های آتی در حوزه ایمنی هوانوردی به کار گرفته شوند. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده نیز از همین روش‌ها برای تحلیل عوامل دیگر مؤثر بر ایمنی استفاده شود تا بتوان بهبودهای بیشتری در این حوزه ایجاد کرد.

یافته‌های تحقیق

در این تحقیق تعداد ۷۸ پرسشنامه بین متخصصان بررسی سوانح و کارشناسان ایمنی(دارای مدرک کارشناسای ارشد ایمنی و دارای تجربه در مباحث مرتبط با ایمنی در سطوح مختلف هوانوردی) توزیع که از این تعداد ۵۹ پرسشنامه تکمیل و برگردانده شد (نسبت پاسخ ۷۵/۷۳ درصدی). توزیع فراوانی پاسخ‌دهندگان پرسش نامه ، نشان می‌دهد ۷۱ درصد از پاسخ‌دهندگان با سابقه خدمتی بیش از ۲۰ سال و ۲۹ درصد از آن‌ها با مدت‌زمان مشارکت در بررسی رویداهای هوانوردی بیشتر از ۱۰ سال و ۸۲ درصد از آن‌ها دوره‌های ایمنی و یا بررسی سوانح گذرانده‌اند. از این تعداد ۴ نفر (۰/۰۶ پاسخ‌دهندگان) دارای مدرک دکترا و ۴۸ نفر (۸۱/۳۵ پاسخ‌دهندگان) دارای مدرک کارشناسی ارشد مرتبط با امور ایمنی هوایی بودند. لذا پاسخ‌دهندگان از تجربه کافی برای پاسخ به سؤالات برخوردار بودند.

جدول ۶– مقایسات توزین اهمیت (٪) عوامل فنی

کد	علت رویداد/ سانحه	FAHP-FQFD	AHP-QFD	AHP
T1	نقص ساختاری	۸/۴۷	۸/۶۴	۵/۶۴
T2	چرخ و تایر	۶/۱۱	۵/۳۶	۵/۴۸
T3	نقص سیستم هیدرولیکی	۷/۸۶	۷/۶۴	۶/۵۶
T4	ناقص روشن شدن موتور /نقص شدید موتور	۱۰/۷۰	۱۱/۹۶	۳۱/۳۸
T5	حرارت بیش‌ازحد موتور/نقص پروانه	۱۰/۰۸	۱۱/۲۰	۲۰/۰۹
T6	کنترل‌های پروازی	۶/۶۳	۶/۰۶	۵/۰۸
T7	خلبان خودکار /FMS	۶/۹۶	۶/۰۶	۵/۰۸
T8	ارتباطات هواپیمایی	۶/۹۷	۶/۳۶	۵/۰۸
T9	طرح /ساختار	۷/۱۹	۶/۵۹	۵/۶۰
T10	حریق، دود (کابین خلبان، کابین، محموله)	۸/۶۳	۸/۳۳	۴/۳۷
T11	اصلاح تایید نشده	۹/۵۰	۹/۹۱	۴/۹۸
T12	سایر موارد	۷/۱۹	۶/۷۲	۲/۲۴

پرسشنامه اول شامل ۱۷ عامل فنی موثر در رویدادها ، در میان کارشناسان مربوطه توزیع گردید و بعد از جمع‌آوری نظر کارشناسان، ۱۲ عامل فنی موثر در رویدادها (شامل نقص ساختاری، چرخ و تایر، نقص سیستم هیدرولیکی، ناقص روشن شدن موتور /نقص شدید موتور، حرارت بیش‌ازحد موتور/نقص پروانه، کنترل‌های پروازی، ارتباطات هواپیمایی، خلبان خودکار، طرح /ساختار، حریق، دود (کابین خلبان، کابین، محموله)، اصلاح تایید نشده و سایر موارد) به عنوان به عنوان رویدادهای اصلی ارزیابی انتخاب شدند.

سپس از پرسش شوندگان خواسته شد به مقایسه زوجی میزان اهمیت عوامل فنی موثر در رویدادها بپردازند. به عنوان مثال پرسیده شد به نظر شما بین عامل فنی چرخ و تایر و نقص سیستم هیدرولیکی کدامیک دارای اهمیت بیستری در بروز رویداد است و به

چه میزان؟(دارای طیف ترجیح یکسان، کمی مرجح، ترجیح بیشتر. ترجیح خیلی بیشتر. و کاملاً مرجح.)

بعد از ترکیب نتایج مقایسات زوجی، با توسعه فازی مقیاس «ساعتی» برای ۹ طیف تعیین شده در پرسشنامه و با استفاده از روش آنالیز توسعه، وزن‌های عوامل فنی موثر در رویدادها تعیین گردید و در ادامه با بهره‌گیری از روش های AHP-QFD و FAHP-FQFD توزین اهمیت عوامل فنی مورد بررسی قرار گرفت.

۵۹ ارزیابی کارشناسان تحقیق را می‌توان از طریق معادله محاسبه کرد. سپس پاسخ‌ها در سه مدل AHP و AHP-QFD و FAHP-FQFD مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که نتایج حاصل در جدول ۵ آمده است. توزین اهمیت عوامل فنی برای تصمیم‌گیری در زمینه ایمنی هوانوردی دارای اهمیت زیادی می‌باشند. بعلاوه این مدل را نیز می‌توان در دسته‌بندی دیگر ریسک‌ها از قبیل عوامل انسانی، محیطی و سازمانی بکار برد.

مؤلفه‌های فنی را به‌وسیله تنظیمات دوبه‌دوی ارزیابی و FQFD رابطه آن‌ها را مبنی بر دانش کارشناس دسته‌بندی می‌کند. عبارت صریح از طریق تابع عضویت مثلثی به‌صورت اعداد فازی $\{VL, L, M,H, VH\}$ مقیاس بندی می‌شوند. ماتریس رابطه بین ردیف i (معیارها) و j ستون در زیر معیارها مشابه رابطه بین CA ها و EC ها است.

در توزین اهمیت این مدل‌ها اختلافات چشمگیری وجود دارد. عوامل فنی T4 (نقص شدید موتور، ناقص روشن شدن موتور) و T5 (حرارت بیش‌ازحد موتور، نقص پروانه) به ترتیب توزین‌های اهمیت ۳۱/۳۸ و ۲۰/۱۰ درصد برای مدل AHP دارند. عوامل فنی T4,T5 به ترتیب در مدل AHP-QFD، ۱۱-۷۱ ، ۱۱/۹۶ و در مدل FAHP-FQFD به ترتیب ۱۰/۷ و ۱۰/۰۸ درصد می‌باشد. توزین اهمیت عوامل فنی دیگر T9 (طرح ساختار)، T10 (حریق و دود)، T11 (اصلاح تایید نشده)، T12 (سایر موارد) در مدل FAHP-FQFD بالاتر ازآنچه در مدل AHP است، می‌باشد.

از میان ۱۲ عامل فنی T4 نقص شدید موتور، ناقص روشن شدن موتور T5، حرارت شدید موتور، نقص پروانه و T9 طرح، ساختار؛ به ترتیب بهتر از سایرین هستند.

همچنین ارزیابی توسط کارشناسان در مدل FAHP-FQFD نشان می‌دهد که فاکتور فنی T9 (طرح-ساختار) به‌اندازه T4(نقص شدید موتور، ناقص روشن شدن موتور) و T5(حرارت بیش‌ازحد موتور/نقص پروانه) حائز اهمیت است.

توزیع مؤلفه‌های فنی در مدل AHP بین اعداد ۲/۲۴ و ۳۱/۳۸ است. در مدل AHP-QFD بین اعداد ۵/۳۶ و ۱۱/۹۶ متغیر و در مدلFAHP-FQFD بین اعداد ۶/۱۱ و ۱۰/۷۰ می‌باشد. در مقایسه با مدل AHP که معیارها /زیر معیارهای مستقل را فرض می‌کند، مدلی تکمیلی FAHP-FQFD می‌تواند مؤلفه‌هایی فنی وابسته به یکدیگر که دارای روابط مشترک چندمرحله‌ای هستند را برای ایمنی هوانوردی آنالیز کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

با توجه به اهمیت مسائل مربوط به ایمنی هوانوردی، استفاده از روش‌های ارتقای ضریب ایمنی یکی از اهداف اصلی صنعت هوانوردی محسوب می‌شود. در این راستا، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به‌عنوان یکی از برنامه‌های کاربردی در ایمنی هوانوردی توسعه یافته است. FAHP با ارزیابی عوامل فنی از طریق مقایسات دوبه‌دو، و استفاده از مدل FQFD برای دسته‌بندی رابطه بین معیارها و زیرمعیارها بر اساس دانش کارشناسی، به یک روش کارآمد تبدیل شده است. این روش امکان اولویت‌بندی معیارها را با استفاده از تجربیات و نقطه نظرات کارشناسان فراهم می‌کند، به‌طوری که با ترسیم جدول وزن‌دهی اهمیت عوامل می‌توان رتبه‌بندی هر معیار را تعیین کرد. یکی از محدودیت‌های موجود در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی این است که ساختار زنجیره‌ای آن به‌قدری انعطاف‌ناپذیر است که زیرمعیارهای مختلف نمی‌توانند تحت تأثیر معیارهای دیگر قرار گیرند. برای رفع این محدودیت، استفاده از منطق فازی در ارزیابی و اصلاح ثبات در حین تحلیل اولویت‌ها مفید است. با بهره‌گیری از ساختار زنجیره‌ای، تحلیل اولویت و بررسی توافق، ارزیابی‌های کارشناسان را می‌توان به‌طور دقیق ترکیب کرده و برای

محاسبه اهمیت و اولویت‌بندی معیارها و زیرمعیارها استفاده کرد.

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های تحلیل سلسله‌مراتبی فازی در مقایسه با مدل‌های تحلیل سلسله‌مراتبی سنتی، به‌ویژه در حوزه سوانح هوایی و مدیریت صنعتی، نتایج بهتری ارائه می‌دهد. این یافته‌ها مشابه نتایج پژوهش‌های پیشین در حوزه‌های صنعتی است که نشان می‌دهند مدل تکمیل شده تحلیل سلسله‌مراتبی با منطق فازی، قابلیت بیشتری در ارائه نتایج دقیق‌تر دارد و به بهبود تصمیم‌گیری‌ها کمک می‌کند. مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به‌ویژه در ارزیابی عوامل فنی مؤثر بر ایمنی هوانوردی اهمیت دارد. یکی از دلایل کلیدی آن این است که سیستم‌های هوانوردی با متغیرها و عوامل متعددی سر و کار دارند که گاهی اوقات بسیار پیچیده و به‌هم‌پیوسته هستند. مدل FAHP با فراهم آوردن چارچوبی برای ارزیابی این عوامل و تعیین اولویت‌ها، به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا اقدامات لازم برای بهبود ایمنی را به‌طور هدفمند انجام دهند. در واقع، این مدل به‌عنوان یک ابزار حمایتی در تصمیم‌گیری‌های کلان ایمنی هوانوردی عمل می‌کند.

علاوه بر این، استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی برای سنجش معیارها و زیرمعیارها، این امکان را فراهم می‌کند که با استفاده از داده‌های کیفی و تجربیات کارشناسان، نتایج دقیق‌تر و قابل‌اتکاتری به دست آید. این مدل نه‌تنها در ارزیابی عوامل فنی، بلکه در تحلیل سایر جنبه‌های ایمنی هوانوردی نیز می‌تواند به کار گرفته شود. برای مثال، این مدل می‌تواند در مدیریت ریسک‌های مربوط به تجهیزات، کارکنان و فرآیندهای عملیاتی نیز مؤثر باشد.

یکی دیگر از نقاط قوت مدل FAHP در مقایسه با مدل‌های سلسله‌مراتبی سنتی، توانایی آن در مدیریت اطلاعات مبهم و غیرقطعی است. این ویژگی به‌ویژه در حوزه هوانوردی که همواره با عدم قطعیت‌هایی مانند شرایط محیطی و عملکرد تجهیزات سر و کار دارد، اهمیت دارد. مدل FAHP با استفاده از منطق فازی، امکان تحلیل دقیق‌تری از این شرایط فراهم می‌آورد و به سازمان‌ها کمک می‌کند تا با اعتماد بیشتری به برنامه‌ریزی و اجرای استراتژی‌های ایمنی بپردازند. از جمله کاربردهای عملی این مدل در هوانوردی، می‌توان به طراحی سیستم‌های ایمنی جدید، ارزیابی کارایی تجهیزات فنی و همچنین برنامه‌ریزی برای مدیریت سوانح احتمالی اشاره کرد. با استفاده از مدل FAHP، سازمان‌های هوانوردی می‌توانند تصمیمات استراتژیک خود را بر اساس تحلیل دقیق و علمی اتخاذ کنند و از این طریق، به کاهش سوانح و افزایش ایمنی دست یابند.

پیشنهاد می‌شود مدل تصمیم‌گیری چند معیاری، با استفاده از گروه‌های کارشناسی و با بهره‌گیری از آزمایش تصمیم‌گیری و آزمایشگاه ارزیابی برای کشف روابط پیچیده و ساخت یک نقشه رابط شبکه‌ای، برای محاسبه توزین‌های مؤثر عوامل فنی برای چیرگی بر مسائل وابستگی و پس‌خوراند در میان معیارها و زیر معیارها، بر طبق مفهوم شبکه آنالیزی پروسه، در خصوص عوامل فنی مربوط به بخش ارزیابی ایمنی هوانوردی بکار گرفته شود

در نهایت، استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی نه‌تنها در بهبود ایمنی هوانوردی، بلکه در سایر حوزه‌های حمل‌ونقل و صنعت نیز می‌تواند به کار گرفته شود. این مدل به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل و مدیریت ریسک‌ها در محیط‌های پیچیده و پرفشار، به سازمان‌ها و مدیران کمک می‌کند تا با دقت بیشتری تصمیم‌گیری کنند و به بهبود عملکرد و ایمنی دست یابند.

منابع و مراجع

۱. بازرسی و ایمنی نهاجا. (۱۳۸۵). سال نامه سوانح هواپیماهای نیروی هوایی (تجزیه‌وتحلیل). چاپخانه مرکزی نهاجا.

۲. مروی نام، محمدرضا و همکاران. (۱۳۹۰). الگوی عوامل مؤثر در بروز سوانح هوایی. نشریه مهندسی هوانوردی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، سال سیزدهم، شماره ۲، پاییز.

3. Kabir, G., & Sumi, R. S. (2014). Fuzzy AHP for Evaluation of Safety in Aviation.

International Journal of Industrial Systems.

۴. رحمانی، سعید و نعمتی، فرشاد(۱۴۰۰).کاربرد مدل‌های فازی در تحلیل و ارزیابی ریسک ایمنی پروازهای تجاری. فصلنامه مدیریت ریسک و ایمنی هوایی، (۲)۵،۷۲-۸۸.

5. Smith, P., & Jones, T. (2021). Safety Management Systems in Aviation: A Comprehensive Guide. Aviation Safety Journal.

6. Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic Hierarchy Process: An Overview of Applications. European Journal of Operational Research, 169(1), 1-29.

۷. نصیر زاده، عزیز، مروی نام، محمدرضا و بخشنده، محمد. (۱۳۹۱). افزایش ضریب ایمنی پرواز با طراحی بانک داده‌ها. نشریه مهندسی هوانوردی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، سال چهاردهم، پاییز.

8. IATA. (2007). IATA’s Accident Classification System. IATA Safety Report, Annex1, A1, 67-71.

9. Boeing. (2009). Aviation Occurrence Categories. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, 23

10. Wiegmann, D., & Shappell, S. (2003). A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis: The Human Factors Analysis and Classification System. Ashgate Publishing Company.

۱۱. جعفری، علی و محمودی، بهروز (۱۳۹۹). بهبود ایمنی هوانوردی با استفاده از سیستم‌های هوشمند و ارزیابی چند معیاره فازی .نشریه صنعت هوانوردی، 10(4)، ۱۰۲-۱۲۰.

۱۲. سلیمانی، رضا و یوسفی، علیرضا (۱۴۰۰) تحلیل تأثیر عوامل فنی بر ایمنی پرواز با استفاده از منطق فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی .نشریه مهندسی ایمنی هواپیمایی، (۳)۶، ۸۹-۱۰۵.

13. Bhattacharya, A., Sarkar, B., & Mukherjee, S. K. (2005). Integrating AHP with QFD for Robot Selection under Requirement Perspective. International Journal of Production Research, 43(17), 3671-3685.

14. Chuang, C. Y. (2008). Application of Fuzzy QFD for Knowledge Acquisition in Product Design. Master Thesis, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan R.O.C.

15. IATA. (2021). Global Aviation Safety Plan. International Air Transport Association.

۱۶. حسینی، محمدرضا و کریمی، احمد (۱۳۹۸). ارزیابی و تحلیل ریسک سوانح هوایی با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی .مجله مهندسی ایمنی و مدیریت ریسک، (۳)۱۲، ۴۵-۶۰.

17. Cornelissen, A., Van Den Berg, J., Koops, W., & Kaymak, U. (2003). Elicitation of Expert Knowledge for Fuzzy Evaluation of Agricultural Production Systems. Agriculture, Ecosystems & Environment, 95(1), 1-18.

18. Renjith, V., Madhu, G., Nayagam, V., & Bhasi, A. (2010). Two-dimensional Fuzzy Fault Tree Analysis for Chlorine Release from a Chlor-Alkali Industry Using Expert Elicitation. Journal of Hazardous Materials, 183(1), 103-110.

19. Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill.

21. Pinto, A., Nunes, I. L., & Ribeiro, R. A. (2010). Qualitative Model for Risk Assessment in Construction Industry: A Fuzzy Logic Approach. Emerging Trends in Technological Innovation, 105-111.

۲۲. عباسی، محسن و فراهانی، محمدرضا(۱۴۰۱). بررسی عوامل مؤثر بر ایمنی هوانوردی با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی فازی .نشریه پژوهش‌های هوایی، (۱)۸،۳۳-۴۷.

23. Hanumaiah, N., Ravi, B., & Mukherjee, N. P. (2006). Rapid Hard

Tooling Process Selection Using QFD-AHP Methodology. Journal of Manufacturing Technology Management, 17(3), 332-350.

24. Wang, L., Sun, R., & Yang, Z. (2009). Analysis and Evaluation of Human Factors in Aviation Maintenance based on Fuzzy and AHP Method. International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 876-880.