ارزیابی خرابی‌های موثر در وقوع سوانح هوایی ایران با استفاده از تحلیل ریسک فازی

امیرحسین نصرتی ملکجهان[۱]، علی حسین‌زاده کاشان[۲*]، بختیار استادی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران؛ a_nosrati@modares.ac.ir

۲ و ۳- دانشیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران؛ a.kashan@modares.ac.ir, bostadi@modares.ac.ir

*نویسنده مخاطب: علی حسین‌زاده کاشان

چکیده

امروزه حمل و نقل هوایی به عنوان یکی از ارکان اساسی در توسعه و پیشرفت‌های اقتصادی و اجتماعی کشورها به شمار می‌رود. باوجود نام بردن از هوانوردی به عنوان ایمن‌ترین روش حمل و نقل، تاریخ این صنعت به مانند سایر طرق حمل و نقل، آبستن سوانح و حوادث ناگوار فراوانی بوده است؛ سوانحی که منجر به خسارت‌های بی‌شمار جانی و مالی شده‌اند. از این رو، تجزیه و تحلیل این سوانح، امری ضروری در این صنعت به شمار می‌رود. در هر سانحه هوایی، گاهی تا هزاران عامل در حوزه‌های مختلف می‌توانند دخیل باشند، یکی از مهم‌ترین این حوزه‌ها عوامل مربوط به ماشین (هواپیما) است که نقش مهمی در بروز این سوانح دارند. با بررسی خرابی‌های متداول موثر در وقوع سوانح هوایی و تعیین و پیاده‌سازی اقدامات اصلاحی و ایمنی، می‌توان از وقوع بسیاری از این خرابی‌ها جلوگیری کرده، عواقب وقوع آن‌ها را کاهش داده و یا نرخ رخداد آن‌ها را تا حد ممکن کم کرد. یکی از تکنیک‌های متداول پرکاربرد برای این منظور، ارزیابی ریسک سیستم مورد نظر است. در این پژوهش، خرابی‌های متداول ماشینی که در بروز سوانح هوایی غیرنظامی ایران موثر بوده‌اند، با بررسی گزارشات رسمی این سوانح استخراج شده و با استفاده از تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی در محیط فازی ارزیابی و رتبه‌بندی شده و در بخش نهایی نیز، اقدامات پیشنهادی و توصیه‌ها برای مقابله با این خرابی‌ها ارائه شده‌اند.

واژه های کلیدی: *هوانوردی – سوانح و حوادث – ایمنی – تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی*

۱- مقدمه

باتوجه به پیشرفت‌های روز افزون بشر، پویایی و پیچیدگی سیستم اقتصادی حاکم بر جهان و نیاز فزاینده به جا به جا کردن بارها و مسافران بین نقاط مختلف، سرعت و ایمنی به دو مقوله حیاتی در صنعت حمل و نقل بدل شده است. در میان طرق مختلف حمل و نقل اعم از زمینی، هوایی و دریایی، هوانوردی به دلیل سرعت فوق العاده بالاتر به نسبت روش‌های دیگر و همچنین قابلیت اطمینان قابل قبول هواپیماهای مدرن امروزی، به محبوب‌ترین و ضروری‌ترین صنعت حمل و نقل در کشورهای مختلف تبدیل شده است. می‌توان گفت که امروزه، صدها تن بار و هزاران مسافر به صورت روزانه با استفاده از این سیستم جا به جا می‌شوند. از هوانوردی همواره به عنوان ایمن‌ترین روش حمل و نقل یاد شده است اما حتی هواپیماهای پیشرفته و چند میلیون دلاری امروزی نیز مانند سایر ساخته‌های دست بشر دچار حادثه‌های کوچک و بزرگ شده و سالانه هزینه‌های هنگفت مالی را به شرکت‌های هواپیمایی و تلفات انسانی زیادی را به عموم جامعه وارد می‌سازند؛ این حقیقت متخصصین و پژوهشگران را بر آن داشته است تا با صرف زمان و هزینه گزاف به تجزیه و تحلیل این حوادث و سوانح پرداخته و از همه ظرفیت‌های موجود در راه جلوگیری از وقوع آن‌ها استفاده کنند.

هوانوردی در ایران پیشینه‌ای طولانی دارد، چهار دهه قبل از این، ناوگان هواپیمایی مسافربری ایران یکی از مدرن‌ترین و ایمن‌ترین خطوط هوایی فعال در سطح جهان بود اما طی سالیان اخیر به دلیل مشکلات متعدد داخلی و خارجی، این صنعت رو به افول رفته و روز به روز آسیب‌پذیرتر شده و لذا پرداختن به حوادث در این صنعت اهمیت دو چندان یافته است.

یکی از رویکردهای مورد استفاده برای مقابله با این حوادث، تجزیه و تحلیل وقایع پیشین و استخراج و ارزیابی عوامل موثر در بروز آن‌ها بوده بطوریکه نرخ وقوع حوادث و سوانح هوایی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد اگر قبل از وقوع یک رویداد جدی، خطاها و خرابی‌ها به طور موثری شناسایی شده باشند. تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی (FMEA) یکی از تکنیک‌های کلاسیک و پرطرفدار در تحلیل ریسک‌ها و خرابی‌های موجود در یک سیستم است. بوسیله این تکنیک، خطاها و خرابی‌ها، علل وقوع آن‌ها، اثرات یا پیامد وقوع آن‌ها تعیین شده و همچنین رتبه‌بندی مهم‌ترین ریسک‌های شناسایی شده نیز معرفی می‌شوند.

بنابر موارد ذکر شده، این پژوهش بر آن است تا ضمن بررسی سوانح هوایی غیرنظامی کشور ایران پس از انقلاب سال ۱۳۵۷، خرابی‌های ماشینی موثر در وقوع این سوانح را از میان عوامل مختلف اثرگذار (انسانی، محیطی، ماشینی) شناسایی کرده و سپس برطبق نظرات خبرگان و با استفاده از تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی، ریسک‌های موجود در این حوزه را ارزیابی کند. در مرحله بعد، امتیازدهی به سه معیار شدت اثر (S)، احتمال وقوع (O) و قابلیت تشخیص (D) با مشارکت خبرگان صنعت در محیط فازی انجام شده و عدد اولویت ریسک فازی (FRPN) محاسبه می‌شود؛ سپس حالات خرابی شناسایی شده، بر حسب مقادیر عدد اولویت ریسک فازی رتبه‌بندی می‌شوند. در بخش آخر تحقیق نیز ریشه‌یابی مهم‌ترین خرابی‌های تعیین شده انجام شده و مجموعه‌ای از توصیه‌ها، هشدارها و اقدامات پیشنهادی برای مقابله با آن‌ها ارائه خواهند شد.

در ادامه این پژوهش، در بخش دوم مروری خواهد شد بر مبانی نظری و پایه‌ای در حوزه سوانح هوانوردی و همچنین مورد مطالعه این پژوهش معرفی خواهد شد. بخش سوم به معرفی روش‌شناسی و فرآیند کلی انجام این تحقیق می‌پردازد؛ بخش چهارم نیز نتایج بدست آمده از طریق پیاده‌سازی مراحل معرفی شده در بخش سوم و خروجی‌های تحقیق را ارائه کرده و بخش پنجم سرانجام، به جمع‌بندی یافته‌های تحقیق، ارائه پیشنهادات، توصیه‌های مدیریتی و اقدامات ضروری پرداخته شده و پیشنهاداتی در راستای انجام تحقیقات آتی در این حوزه معرفی می‌شوند.

۲- مبانی نظری و مورد مطالعه

ارزیابی سوانح هوایی یکی از پرچالش‌ترین و تخصصی‌ترین حوزه‌های تحقیق است. ویژگی‌های فرآیند پرواز، پیچیدگی ساختار هواپیماها و حساسیت‌های موجود سبب آن شده‌اند که تحقیق در این حوزه نیازمند فنون خاصی باشد. هواپیماهای مدرن، آمیزه‌ای خارق‌العاده از علم و مهندسی هستند به طوریکه امروزه از آن‌ها به عنوان ایمن‌ترین وسیله نقلیه با بالاترین قابلیت اطمینان یاد می‌شود؛ اما با این وجود، آن‌ها مصون از خرابی و نقص نبوده و گهگاه این نقوص فنی پیش آمده منجر به سوانح و حوادث ناگواری می‌شوند [۱]. لذا بررسی و ریشه‌یابی این عوامل می‌تواند در کاهش بروز این وقایع ناخواسته موثر باشد، همچنان که راه‌حل مذکور، مورد استفاده در این پژوهش نیز بوده است.

۲-۱- سوانح هوایی غیرنظامی

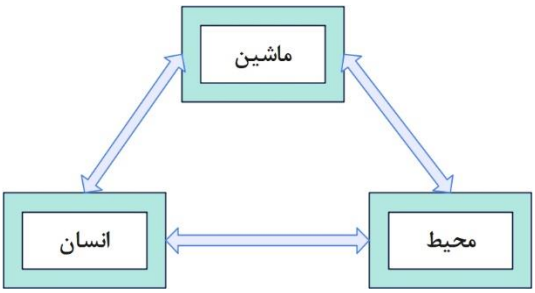
از زمان ساخت اولین و ابتدایی‌ترین وسائل نقلیه پرنده تا به امروز، حوزه هوانوردی شاهد وقایع گاها ناگوار کوچک و بزرگی بوده است. این وقایع به طور مستمر هزینه‌های گزاف مالی و جانی فراوانی را به فعالان این حوزه تحمیل کرده و حتی در برخی موارد منجر به ایجاد مشکلات اجتماعی سیاسی شدیدی شده‌اند؛ حتی پیشرفته‌ترین هواپیماهای گران‌قیمت امروزی نیز گهگاه دچار این وقایع مذکور می‌شوند، لذا تلاش هوانوردان و محققان در طول تاریخ در جهت کاهش رخداد این وقایع بوده است. از منظر دیگر برای پیشبرد این هدف و همچنین به منظورتسهیل و سازماندهی اقدامات انجام شده در این حوزه، وجود تعاریف و دستورالعمل‌های دقیق در حیطه سوانح هوایی به خصوص بخش مسافربری، حیاتی به نظر می‌رسد. می‌توان گفت که هزاران هزار رویداد به صورت روزانه در سیستم هوانوردی در سرتاسر جهان اتفاق می‌افتد؛ از ترکیدگی لاستیک گرفته تا سقوط‌های دلخراش نادر، همه و همه می‌توانند به بخشی از این وقایع هوانوردی مرتبط باشند، لذا تعاریف و مفاهیم دقیقی نیز در طول تاریخ برای این موضوع به ثبت رسیده‌اند.

واژه "وقایع" بدین دلیل استفاده می‌شود که طیف وسیعی از هرآنچه که در هوانوردی اتفاق می‌افتد را شامل شود به صورتی که همه تعاریفی که در ادامه این بخش معرفی می‌شوند به نوعی واقعه به حساب می‌آیند. برای ارجاع به مفاهیم حوزه سوانح هوانوردی بخش غیرنظامی، سازمان بین‌المللی هوانوردی غیرنظامی یا ایکائو (ICAO) مرجع اصلی و رسمی است که همه مسائل مربوط به این موضوع توسط این سازمان بین‌المللی رسیدگی می‌شوند. مفهوم سانحه یا حادثه در ادبیات هوانوردی می‌تواند تعاریف و خصوصیات خاص خود را داشته باشد. با بررسی اسناد و تعاریف معتبر موجود در این حوزه، قابل ذکر است که مرجع اصلی که توسط تقریبا همه کشورهای جهان در مقوله سوانح هوایی استفاده می‌شود، ضمیمه شماره ۱۳ ایکائو است [2].

در این سند، همه موارد لازم برای رویارویی با سوانح و حوادث هوایی غیرنظامی اعم از تعاریف و کاربردها، روش بررسی وقایع و نکات مهم، گزارش‌دهی و دستورالعمل‌های نتیجه‌گیری و هرآنچه که در این حوزه لازم به نظر می‌رسد توسط این سند ارائه می‌شود. اما در بخش تعاریف این سند، وقایع در هوانوردی در سه دسته موضوع معرفی شده‌اند. به طور خلاصه حادثه (Accident) عبارت است از رویدادی مرتبط با عملیات هواگرد که طی آن افراد به طور شدید یا مهلک آسیب ببینند، هواگرد دچار خسارات و نقصان‌های جدی و مهلک شود و یا هواگرد به طورکلی گم شده یا غیرقابل دسترسی شود. سانحه (Incident) واقعه‌ای مربوط به عملیات هواگرد به غیر از حادثه که بر ایمنی عملیات اثر دارد یا می‌تواند اثر داشته باشد. سانحه جدی (Serious incident) نیز اینگونه تعریف می‌شود که سانحه‌ای که در آن شرایط به گونه‌ای است که نشان می‌دهد وقوع یک حادثه نزدیک بوده است. تنها تفاوت میان حادثه و سانحه وخیم، نتیجه آن است. البته در حوزه وقایع هوانوردی مفاهیم دیگری نیز وجود دارند که در برخی منابع استفاده شده‌اند اما مرجع معتبر تنها اسناد ایکائو در نظر گرفته شده است. یکی از اسناد معتبر و مرجع دیگر این حیطه، سند دسته‌بندی وقایع هوانوردی است که به طور مشترک توسط ایکائو و تیم ایمنی هوانوردی تجاری (Commercial aviation safety team) منتشر شد [3]. در این سند تلاش شده است تا همه وقایع مختلف که در هوانوردی عمومی رخ می‌دهند در قالب دسته‌بندی‌های مختلف معرفی شوند. بدین منظور، وقایع مذکور در قالب ۷ گروه وقایع مربوط به هواپیما، عملیات‌های زمینی، آب و هوا، فرود و برخواست، عوامل مرتبط در طول پرواز، غیرمرتبط با هواپیما و عوامل متفرقه و همچنین ۳۸ زیرگروه مختلف تعریف شده‌اند. در این پژوهش منظور از واژه سوانح همان حوادث و سوانح وخیم در نظر گرفته شده است.

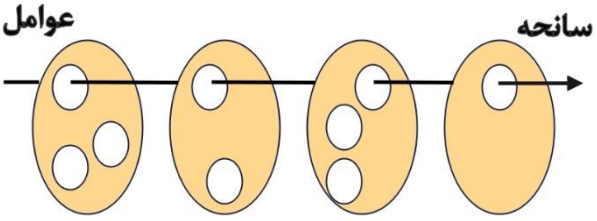
۲-۲- عوامل موثر در وقوع سوانح هوانوردی

همانگونه که در ابتدای بخش ۲ ذکر شد، بررسی سوانح هوایی به شدت دشوار، هزینه‌بر و زمان‌بر است. در فرآیند بررسی ممکن است تیم بزرگی متشکل از خبرگان و مهندسین از بخش‌های مختلف در کنار یکدیگر کار کنند تا علل سانحه، عوامل دخیل و نتایج بدست آمده را مشخص کنند. در هر سانحه ممکن است طیف گسترده‌ای از حوزه‌ها و عوامل دخیل باشند که لازم است هریک به صورت تخصصی مورد نظر و بررسی قرار گیرند. عوامل دخیل می‌توانند شامل خرابی‌های مکانیکی، خطاهای انسانی، عوامل محیطی، ضعف‌های سازمانی و مدیریتی، عوامل سیاسی و ... باشند. در مورد موارد پیچیده‌ای مانند سقوط‌های ابهام‌آمیز گاها هزاران عامل در حوزه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. یکی از مدل‌های محبوب در بررسی عوامل موثر در وقوع سوانح هوایی مدل سه شاخگی انسان، ماشین و محیط است [۴]. مدل سه شاخگی یکی از مدل‌های رایج و سنتی در ارزیابی حوادث در بخش‌های مختلف است. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است این مدل همه عوامل موثر در بروز سوانح هوایی را در سه دسته مذکور تقسیم‌بندی کرده است. امروزه با پیشرفت تحقیقات، ثابت شد که علاوه بر این سه دسته عامل، گروه‌ها و دسته‌های دیگری نیز می‌توانند دخیل باشند که به نوبه خود اهمیت بالایی نیز دارند؛ همچنین در این مدل تاثیرگذاری و اهمیت هر دسته عامل به صورت یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل ۱-مدل سه شاخگی تحلیل سوانح

یکی دیگر از مدل‌های محبوب در بررسی سوانح، مدل پنیر سوئیسی است [5]. این مدل همه طیف‌های عوامل اثرگذار را به صورت وقایع سلسله-وار و وابسته به هم نشان می‌دهد که در صورت بروز دومینوار آن‌ها یک رخداد ناگوار روی می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ به نمایش گذاشته شده است، این مدل متشکل تکه‌های پنیر است که همان عملیات‌ها و فرآیندها را در سیستم مد نظر نشان می‌دهند و در داخل این تکه پنیرها، سوراخ‌هایی وجود دارد به مثابه عوامل ایجاد کننده یک سانحه که در این مورد همان خرابی‌ها هستند. این عوامل ممکن است مکررا یا گهگاه به صورت منفرد بدون داشتن نتایج مضر روی دهند اما هنگامی که با هم ترکیب شده یا به عبارت دیگر حفره‌های تکه‌های پنیر در یک راستا (در یک زمان) قرار می-گیرند، احتمال وقوع یک رخداد ناگوار مانند سانحه هوایی افزایش پیدا می-کند [6].



شکل ۲-مدل پنیر سوئیسی

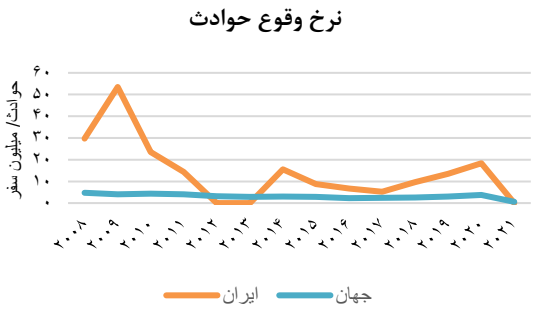
مدل پرکاربرد بعدی که آن را هرم هنریچ (Heinrich pyramid) نام‌گذاری کرده اند یکی دیگر از مدل‌ها در تحلیل سوانح هوایی است [7]. این مدل به طور مشخص در حوزه هوانوردی حوادث را به عنوان خطرات ایمنی کم رخداد و پرخطر در بالای هرم نشان می‌دهد. با حرکت به سمت پایین بر روی هرم، لایه‌های بعدی شامل حوادث و اعمال ناامن هستند که خطر کمتر اما فراوانی بیشتری دارند. در این مدل، ارتباط و نقش عوامل اثرگذار در سطوح پایین‌تر در ایجاد یک حادثه سخت بررسی می‌شود. شکل ۳ شماتیک این طرح را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این هرم منظور از حادثه همان (Accident) و سانحه همان (Incident) است که در بخش ۲-۱ تعریف شده‌اند.

شکل ۳- هرم هنریچ

۲-۳- مورد مطالعه

هوانوردی غیرنظامی یا مسافربری در ایران سابقه‌ای طولانی دارد. می‌توان گفت که کشور ایران اولین کشور در منطقه خاورمیانه بود که نخستین خطوط هوایی مدرن را تاسیس کرد. بنابر منابع موجود، این صنعت از سال ۱۳۲۰ هجری شمسی شروع به کار کرده است. با گسترش این صنعت در ایران و توجهات خاص آن زمان، طی سال‌های ۱۳۴۵-۱۳۵۵ هوانوردی ایران یکی از پیشرفته‌ترین و ایمن‌ترین سیستم‌های حمل و نقل هوایی در جهان به‌شمار می‌رفت. هزاران مسافر داخلی و خارجی با استفاده از خطوط مسافربری هوایی موجود در ایران به مقاصد دور و نزدیک سفر می‌کردند و رونق قابل توجهی در اقتصاد آن دوره نیز ایجاد کرده بودند.

طی سه دهه گذشته، سیستم مذکور رو به افول و ضعیف‌تر شدن پیش رفته است. تحریم‌های بین‌المللی گوناگون علیه این صنعت، مشکلات و بحران‌های اقتصادی، سوء مدیریت‌های موجود در ساختار سازمانی، عدم امکان خرید هواپیماهای جدید و حتی تهیه قطعات فنی مورد نیاز، فرسودگی و عمر بالای ناوگان فعال، همه و همه مسبب آن شدند که این سیستم آسیب‌پذیرتر و فرسوده‌تر شود به طوریکه بنابر اطلاعات رسمی امروزه نیمی از هواپیماهای موجود در ایران به دلایل فنی و غیرفنی زمینگیر و غیرفعال هستند. اولین حادثه رسمی ثبت شده در هوانوردی غیرنظامی ایران را می‌توان به هواپیمای بوئینگ که در سال ۱۳۵۸ در مسیر مشهد به تهران در اطراف کوه‌ها لشگرک سقوط کرد اشاره کرد. بنابر اطلاعات موجود تا آذر سال ۱۳۹۸، تعداد ۲۱۵۲ نفر در سوانح این بخش جان خود را از دست داده‌اند. شکل ۴ نرخ وقوع حوادث در ایران را در مقایسه با میزان جهانی نشان می‌دهد.



شکل ۴-نمودار نرخ وقوع حوادث در ایران و جهان

همانطور که در شکل ۴ نمایش داده شده است، متوسط وقوع حوادث در ایران به طور قابل توجهی بیشتر از نرخ جهانی است؛ همچنین بنابر اطلاعات منابع داخلی، نرخ وقوع نقص‌های فنی و مکانیکی در بین ناوگان فعال کشور، رقم قابل توجهی است. همه این موارد حاکی از آن هستند که پرداختن به مقوله ایمنی در یک چنین سیستمی امری ضروری به نظر می‌آید. سازمان هواپیمایی کشوری ایران، مسئول رسیدگی به وقایع هوانوردی مختلف است. این سازمان باید رخداد این وقایع را تایید، علل احتمالی دخیل در واقعه را شناسایی، عوامل موثر را تعیین کرده و جنبه‌های مختلف آن را تحلیل نماید و سرانجام، گزارشی جامع و رسمی را در اختیار اذهان عمومی و سازمان‌های مربوطه مانند ایکائو قرار دهد. در حقیقت این سازمان یک دپارتمان مخصوص به نام دفتر بررسی سوانح و حوادث هوایی دارد؛ بازرسان و محققان خبره‌ای که در این دفترمشغول به کار هستند به نام هیئت بررسی حوادث هوایی نیز شناخته می‌شوند که در این دفتر به صورت تخصصی بر روی وقایع مختلف در صنعت هوانوردی غیر نظامی ایران کار می‌کنند.

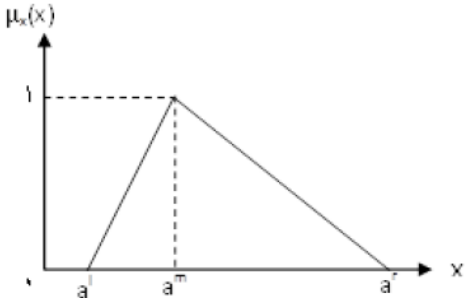
۲-۴-منطق فازی

نظریه مجموعه فازی، برای اقدام در شرایط عدم اطمینان استفاده می‌گردد. این نظریه قادر است بسیاری از مفاهیم، متغیرها و نظام‌هایی را که غیردقیق و مبهم هستند، صورت‌بندی ریاضی بخشد و زمینه را برای استدلال، استنتاج، پایش و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد. واضح است که بسیاری از تصمیمات و اقدامات ما در شرایط عدم اطمینان است و حالت‌های واضح غیرمبهم، بسیار نادر و کمیاب هستند [۸]. براساس این نظریه، یک عدد فازی، مجموعه فازی خاصی را به صورت رابطه مذکور در $\tilde{A} = x \in R/\mu_{\tilde{A}}(x)$ معرفی می‌کند که در آن، x مقدار حقیقی عضو مجموعه R را می‌پذیرد و تابع عضویت آن به صورت $\mu_{\tilde{A}}(x)$ می‌باشد.

بیشترین اعداد فازی مورد استفاده، اعداد فازی مثلثی و ذوزنقه‌ای هستند به طوری که اعداد فازی مثلثی، دلیل محاسبات ساده‌تر، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک عدد فازی مثلثی، $\tilde{A} = (a^l, a^m, a^u)$ عددی با تابع عضویت تکه‌ای خطی μ_A به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$\mu_x(x) = \begin{cases} \dfrac{(x-a^l)}{(a^m-a^l)}, & a^l \le x < a^m \\ 1, & x = a^m \\ \dfrac{(a^r-x)}{(a^r-a^m)}, & a^m < x \le a^r \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (۱)$$

شکل ۵ نیز این تابع عضویت را نمایش می‌دهد.



شکل ۵-نمایش عدد فازی مثلثی

در مطالعات ریسک وجود اطلاعات نه چندان دقیق و ناقص و به کارگیری متغیرهای کلامی از قبیل کم، متوسط و زیاد، برای اندازه‌گیری متغیرهای احتمال وقوع و شدت اثر، فرآیند تصمیم‌گیری را مشکل و دقت پردازش‌ها را کاهش می‌دهد. منطق فازی با استفاده از مقادیر و متغیرهای کلامی یا به عبارتی دانش فرد خبره، شیوه‌های مرسوم برای طراحی و مدلسازی یک شبکه را که نیازمند ریاضیات پیشرفته و نسبتاً پیچیده است میسر می‌کند و به همین دلیل در روش‌های تحلیل ریسک کمی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

۲-۵-تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی فازی

روش تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی فازی (FFMEA) در ارزیابی ریسک روشی تحلیلی است که می‌کوشد تا حد ممکن خطرات بالقوه موجود در محدوده‌ای که در آن ارزیابی ریسک انجام می‌شود و همچنین علل و اثرات مرتبط با آن را شناسایی و رتبه‌بندی کند. در این روش رتبه‌بندی حالات بالقوه خطر با توجه به سه پارامتر شدت اثر خطر، احتمال وقوع خطر و احتمال کشف خطر صورت می‌پذیرد که به هریک از عوامل فوق مقادیری بین ۱ تا ۱۰ تخصیص داده می‌شود و از حاصلضرب این سه پارامتر عدد اولویت ریسک (RPN) که عددی بین ۱ تا ۱۰۰۰ است، به دست می‌آید؛ به طوری که مقدار بیشتر بیانگر تاثیر نامطلوبتر پارامترها است [9].

از جمله کاستی‌های این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [10]:

- ممکن است مقادیر S,O,D در رتبه‌بندی اعداد اولویت کاملاً یکسانی را به وجود آورد، اما در مقابل ممکن است مفهوم پنهان ریسک آنها نیز کاملا متفاوت باشد.
- بسیاری از اطلاعات موجود در این روش ترتیبی هستند و اهمیت نسبی میان پارامترهای شدت اثر، احتمال وقوع و احتمال کشف خطر در نظر گرفته نشده و معمولاً فرض می‌شود که این سه فاکتور اهمیت یکسانی دارند.
- تعیین دقیق این سه فاکتور دشوار است؛ زیرا بسیاری از اطلاعات را در یک میئله FMEA می‌توان با واژگان زبانی نظیر احتمالا، مهم، خیلی زیاد و به زودی بیان کرد.

در این تحقیق، با توجه به مشکلات و کاستی‌های روش سنتی تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی و همچنین مدلسازی عدم قطعیت مرتبط با واژه‌های زبانی در اخذ نظرات متخصصین، این تکنیک با منطق فازی ترکیب شده است. در این تکنیک جهت ایجاد مدل برای محاسبه درجه اولویت ریسک و اولویت‌بندی خطرات و اثرات آن‌ها با استفاده از تئوری فازی، شش گام اصلی زیر باید طی شود:

۱- تشکیل تیم: قدم اول در این تکنیک تشکیل گروهی است که بتواند با استفاده از تجربه و تخصص خود، ادامه مراحل را به خوبی انجام و برروی روند اجرای آن نظارت داشته باشد. این خبرگان می‌توانند از بخش‌های تحقیق و توسعه، طراحی، نگهداری و تعمیرات و ... انتخاب شوند؛ تعداد اعضای تیم نیز معمولا بین ۵-۷ نفر در نظر گرفته می‌شود. گرداننده و هماهنگ کننده این تیم نیز در این مرحله تعیین می‌شود.

۲- شناسایی مخاطرات و ریسک‌ها: در این مرحله با توجه به اطلاعات و داده‌های موجود، فهرستی از ریسک‌ها و خرابی‌ها برطبق نظرات اعضای تیم تعیین می‌شوند.

۳- تعریف مقیاس‌های امتیازدهی و توابع عضویت فازی: در این گام با بررسی مطالعات کتابخانه‌ای و استفاده از نظرات کارشناسان، معیارهای امتیازدهی به سه فاکتور مدنظر تحقیق با استفاده از متغیرهای کلامی و توابع عضویت تعریف شده، تخصیص داده می‌شوند به طوریکه اگر M یک متغیر زبانی باشد، می‌توان عدد فازی مثلثی مربوط به آن متغر زبانی را به صورت رابطه (۲) تعریف نمود.

$$M = (l, m, u) \quad (۲)$$

۴- حل مسئله: برای حل مساله روش‌های متفاوتی وجود دارد اما با توجه به ساده و مفهومی بودن روش حاصلضرب سه عدد فازی مثلثی، در این تحقیق، از این روش استفاده شده است. در این روش ابتدا با استفاده از عملیات ضرب اعداد فازی مثلثی به صورت رابطه (۳)، سه پارامتر شدت خطر، احتمال وقوع خطر و احتمال کشف خطر به صورت فازی در هم ضرب شده و به صورت یک عدد فازی مثلثی محاسبه می‌گردد [۱۱].

$$\begin{aligned} RPN = S \times O \times D &= (l_1, m_1, u_1) \times (l_2, m_2, u_2) \\ &\times (l_3, m_3, u_3) \\ &= (l_1 l_2 l_3, m_1 m_2 m_3, u_1 u_2 u_3) \end{aligned} \quad (۳)$$

۵- غیرفازی کردن عدد اولویت ریسک: فازی‌زدایی یک مرحله مهم در سیستم‌های فازی است. در سیستم‌های فازی، نتایج یک استدلال تقریبی معمولاً به صورت یک چند مجموعه فازی است. در این موارد لازم است خروجی فازی سیستم تبدیل به یک عدد غیر فازی (عدد قطعی) شود. در این تحقیق از روش میانگین فازی، یکی از متداول‌ترین روش‌های فازی‌زدایی اعداد فازی مثلثی به صورت رابطه (۴) استفاده می‌شود.

$$Def\ (M) = \frac{l + 2m + u}{4} \qquad (۴)$$

۶- تعیین سطح ریسک و نتیجه‌گیری: برای انجام اقدامات کنترلی باید شاخصی به عنوان سطح ریسک در جهت بیان اهمیت نسبی فاکتورهای ریسک تعیین شود. مقدار این شاخص بر اساس قوانین و مقررات هر سازمان و میزان توانایی آن در تامین هزینه‌های مورد نیاز پروژه، متغیر است. در این تحقیق نیز با تعیین شاخص‌قابل اندازه‌گیری، به تعیین سطح و بررسی‌های بیشتر ریسک‌های امتیازدهی شده پرداخته می‌شود.

۳- روش‌شناسی پژوهش

در این تحقیق، ابتدا فهرستی از حوادث و سوانح وخیم هوانوردی غیرنظامی ایران پس از انقلاب سال ۱۳۵۷ تهیه شده است. پس از آن، گزارشات رسمی این وقایع از پایگاه داده سازمان هواپیمایی کشوری ایران و منابع معتبر بین‌المللی دیگر مانند پایگاه داده سازمان ایکائو و شبکه ایمنی هوانوردی استخراج شده است. در مرحله بعد ضمن مطالعه و بررسی موشکافانه این گزارشات و اطلاعات، خرابی‌های ماشینی مربوط به سیستم هواپیما که در بروز این وقایع دخیل بوده، استخراج شده‌اند. پس از آن، گام‌های تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی اجرا شده و خرابی‌های مورد نظر امتیازدهی، تحلیل و رتبه‌بندی می‌شوند. در بخش آخر نیز نتایج بدست آمده از تحقیق ارائه شده، تعدادی اخطاریه، توصیه و اقدامات ایمنی پیشنهادی نیز به عنوان خروجی‌های مطلوب پژوهش معرفی می‌شوند.

۴- پیاده‌سازی روش تحقیق و تحلیل نتایج

در طول تاریخ این صنعت، پژوهشگران روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی را با هدف ارتقای ایمنی بکار گرفته‌اند.. هرکدام از این تحقیقات انجام شده منجر به نتایج مفیدی در حوزه‌های مختلف این صنعت شده‌اند. یکی از ارکان اصلی در تحلیل سوانح هوایی، تجزیه و تحلیل نقش هواپیما در بروز آن حادثه است. می‌توان گفت که عامل ماشینی در کنار عامل انسانی مهم‌ترین اجزای دخیل در این حوزه‌اند. در موضوع عوامل ماشینی، خرابی‌ها، نقصان و کارکردهای نامناسب اجزای فیزیکی و مکانیکی در ساختار هواپیما می‌تواند منجر به وقوع اتفاقات سلسله‌وار بعدی و در نهایت یک فاجعه شود. تمرکز اصلی این پژوهش نیز به دلیل اهمیت ذکر شده، برروی خرابی‌های ذکر شده در بخش ماشین است.

با توجه به مراحل ذکر شده در بخش ۳ این تحقیق، به طورکلی ۴۶ مورد حادثه و سانحه وخیم در بازه زمانی مذکور شناسایی شدند. پس از آن با بررسی موشکافانه گزارشات و اطلاعات موجود در مورد این وقایع، خرابی‌های اثرگذار در وقوع آن‌ها شناسایی شده است؛ بدین منظور تعدادی از خرابی‌ها به طور مستقیم در خلال گزارشات معرفی شده بودند که استخراج شدند، برخی از آن‌ها که به طور مستقیم تعیین نشده و از دیدگاه محققین این پژوهش ضروری در نظر گرفته شدند نیز اضافه شده‌اند. علاوه بر این، فهرست خرابی‌هایی که تا این مرحله استخراج شده‌اند در اختیار تیم خبرگان این تحقیق که همان تیم پیاده‌سازی تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی نیز هستند قرار داده شد و طبق نظرات آن‌ها تعدادی از این خرابی‌ها که ضرورتی برای بررسی نداشتند حذف شده و تعداد قلیلی نیز با نظر مستقیم خبرگان به فرآیند تحقیق اضافه شدند. خبرگان این تحقیق شامل ۵ نفر از متخصصین و بازرسین دفتر بررسی سوانح و حوادث سازمان هواپیمایی کشوری ایران، یک نفر از پرسنل تعمیر و نگهداری ایران ایر و یک نفر از اساتید اکادمیک دانشکده صنعت هواپیمایی کشوری بوده‌اند و فرآیند این تحقیق براساس توزیع و تکمیل پرسشنامه‌های مربوطه میان خبرگان انجام شده است. در نهایت پس از برگزاری جلسات و انجام اقدامات مربوطه، پس از ایجاد توافق نظر در میان خبرگان تحقیق، ۱۰ مورد از خرابی‌های تاثیرگذار در وقوع حوادث و سوانح وخیم در هوانوردی غیرنظامی ایران تعیین شدند که به عنوان حالات شکست در تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی در نظر گرفته که در جدول ۱ نیز مشخص شده‌اند.

جدول ۱-لیست خرابی‌ها

شماره	مشخصه	خرابی (حالت شکست)
۱	F1	خرابی در سیستم ارابه فرود اصلی
۲	F2	خرابی در موتورها و از دست دادن نیرو
۳	F3	خرابی در سیستم هیدرولیک
۴	F4	خرابی و شکست قطعه torsion link
۵	F5	خرابی در سیستم ضد لغزش
۶	F6	خرابی در سیستم کنترل الکرونیکی موتور
۷	F7	شکستن دیسک ردیف اول کمپرسور کم فشار موتور
۸	F8	خرابی و از دست دادن سطوح کنترل هواپیما
۹	F9	پارگی لوله‌های سوخت
۱۰	F10	خرابی در سیستم ترمزها

برای دستیابی به نتایج این بخش، الگوریتم توضیح داده شده برای تکنیک تجزیه و تحلیل حالات خرابی فازی در بخش۲ این پژوهش، مرحله به مرحله اجرا شده است به طوریکه توضیحات و نتایج حاصل از آن در ادامه ذکر شده‌اند. جداول امتیازدهی معرفی شده در این بخش، براساس مورد مطالعه این تحقیق که مربوط به صنعت هوانوردی است، به طور اختصاصی تدوین شده است. برای ادغام نظرات خبرگان در این تحقیق، با استفاده از روش میانگین هندسی در اعداد فازی، مقادیر نهایی شاخص‌های شدت اثر، وقوع و قابلیت تشخیص بدست آمده‌اند [۱۲]. پس از آن، مقدار عدد اولویت ریسک فازی برای هریک از حالات خرابی با استفاده از رابطه (۳)، محاسبه شده است. در مرحله بعد، با استفاده از رابطه (۴) مقادیر عدد اولویت ریسک فازی‌زدایی شده و به اعداد قطعی برای هر حالت شکست تبدیل می‌شوند. در انتها نیز حالات شکست براساس عدد اولویت ریسک مربوطه‌شان مطابق آنچه در جدول ۷ نشان داده شده است، رتبه‌بندی می‌شوند.

در خلال انجام امتیازدهی توسط خبرگان، گرداننده تیم که همان محقق این پژوهش بوده‌است، با حضور در کنار خبرگان، ابهامت موجود در مورد حالات خرابی، مقیاس‌ها و ... را برطرف کرده و به ایجاد هماهنگی و تعاملات سازنده میان خبرگان کمک کرده است. در ادامه، مقیاس‌های امتیازدهی و توابع عضویت مربوط به شاخص شدت اثر، در جدول ۲ تعیین شده‌اند.

جدول ۲-مقیاس امتیازدهی برای شدت اثر

اثر	شرح	عددفازی
فوق‌العاده زیاد	عواقب وخیم، مرگ و میر زیاد، نابودی هواپیما بدون اخطار	(۰.۹, ۱, ۱)
خیلی زیاد	عواقب وخیم، مرگ و میر زیاد، نابودی هواپیما با اخطار	(۰.۸, ۰.۹, ۱)
نسبتا زیاد	عواقب جبران‌ناپذیر، صدمات انسانی وخیم مانند قطع عضو، صدمات اساسی به هواپیما و غیرقابل استفاده شدن آن	(۰.۷, ۰.۸, ۰.۹)
زیاد	عواقب، صدمات انسانی و مالی شدید به هواپیما عواقب قابل توجه، صدمات انسانی نیازمند	(۰.۶, ۰.۷, ۰.۸)
متوسط	مراقبت ویژه صدمات زیاد به هواپیما نیاز به تعمیر اساسی	(۰.۴, ۰.۵۵, ۰.۷)
کم	عواقب و صدمات انسانی متوسط، آسیب‌های محدود به هواپیما	(۰.۳, ۰.۴, ۰.۵)
نسبتا کم	عواقب و صدمات سبک به هواپیما و انسان مانند کبودی و زخم	(۰.۲, ۰.۳, ۰.۴)
خیلی کم	عواقب و صدمات خفیف به انسان و هواپیما	(۰.۱, ۰.۲, ۰.۳)
فوق‌العاده کم	عواقب و آسیب‌ها کم و قابل چشم‌پوشی	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)
بدون اثر	بدون آسیب به انسان و هواپیما	(۰.۰, ۰.۰, ۰.۱)

در جدول ۳ نیز، مقیاس‌های رتبه‌بندی برای شاخص احتمال وقوع تعیین شده‌اند. لازم به ذکر ات که منظور از سیکل پرواز در این جدول عبارت است از یک بار برخاستن و فرود هواپیما است. به عنوان مثال، چرخه پرواز به معنای کارکرد موتور از زمانی که هواپیما از زمین جدا می‌شود تا زمانی که در پایان پرواز با زمین را لمس می‌کند. لمس و فرود نیز باید به عنوان چرخه پرواز در نظر گرفته شود.

جدول ۳- مقیاس امتیازدهی برای احتمال وقوع

رخداد	شرح	عددفازی
حتمی	بزرگتر یا مساوی ۱۰۰ مورد در هر ۱۰۰۰ سیکل پرواز	(۰.۹, ۱, ۱)
بسیار زیاد	بزرگتر یا مساوی ۵۰ مورد در هر ۱۰۰۰ سیکل پرواز	(۰.۸, ۰.۹, ۱)
زیاد	بزرگتر یا مساوی ۲۰ مورد در هر ۱۰۰۰ سیکل پرواز	(۰.۷, ۰.۸, ۰.۹)
نسبتا زیاد	بزرگتر یا مساوی ۵ مورد در هر ۱۰۰۰ سیکل پرواز	(۰.۶, ۰.۷, ۰.۸)
متوسط	بزرگتر یا مساوی ۳ مورد در هر ۱۰۰۰ سیکل پرواز	(۰.۵, ۰.۶, ۰.۷)
کم	بزرگتر یا مساوی ۲ مورد در هر ۱۰۰۰ سیکل پرواز	(۰.۴, ۰.۵, ۰.۶)
خیلی کم	بزرگتر یا مساوی ۱ مورد در هر ۱۰۰۰ سیکل پرواز	(۰.۳, ۰.۴, ۰.۵)
بعید	بزرگتر یا مساوی ۰.۵ مورد در هر ۱۰۰۰ سیکل پرواز	(۰.۲, ۰.۳, ۰.۴)
خیلی بعید	بزرگتر یا مساوی ۰.۱ مورد در هر ۱۰۰۰ سیکل پرواز	(۰.۱, ۰.۲, ۰.۳)
غیرممکن	بزرگتر یا مساوی ۰.۰۱ مورد در هر ۱۰۰۰ سیکل پرواز	(۰.۱, ۰.۰, ۰.۰)

و همچنین مقیاس رتبه‌بندی و درجات عضویت برای شاخص قابلیت تشخیص در جدول ۴ مشخص شده‌اند.

جدول ۴- مقیاس امتیازدهی برای قابلیت تشخیص

تشخیص	شرح	عدد فازی
کاملا غیر ممکن	کاملا غیر قابل تشخیص	(۰.۸, ۰.۹, ۱)
خیلی کم	شانس تشخیص ناچیز است	(۰.۶, ۰.۷, ۰.۸)
متوسط	با احتمال ۵۰/۵۰ تشخیص داده می‌شود	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)
زیاد	با احتمال بالا تشخیص داده می‌شود	(۰.۲, ۰.۳, ۰.۴)
حتمی	حتما تشخیص داده می‌شود	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)

تعیین سطح ریسک‌ها برای صدور پیشنهادات و انجام اقدامات اصلاحی براساس عدد اولویت ریسک فازی‌زدایی شده برحسب جدول ۵ انجام می‌شود.

جدول ۵-درجه‌بندی ریسک‌ها

سطح ریسک	نماد	RPN	نتایج و اقدامات
خیلی کم	VL	کمتر از ۰.۰۶	نیاز به اقدام اصلاحی نیست
کم	L	بین ۰.۰۶ تا ۰.۰۸	اولویت پایین برای اقدام اصلاحی
متوسط	M	بین ۰.۰۸ تا ۰.۱۰	اولویت متوسط برای اقدام اصلاحی
زیاد	H	بین ۰.۱۰ تا ۰.۱۲	اولویت بالا برای اقدام اصلاحی
خیلی زیاد	VH	بیشتر از ۰.۱۲	اقدامات اصلاحی کاملا ضروری

برای دستیابی به نتایج نهایی، پرسشنامه مربوطه که شامل حالات خرابی (ریسک) مدنظر این پژوهش به همراه جداول امتیازدهی است در اختیار خبرگان قرار گرفت و از آنان خواسته شد تا برطبق نظر خود و با استفاده از متغیرهای کلامی موجود، سه معیار مذکور را توصیف نمایند. پس از جمع‌آوری پرسشنامه‌ها، مقادیر نهایی معیارهای شدت‌اثر، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص که براساس نظرات ادغام شده خبرگان با استفاده از رابطه (۵) طبق روش میانگین هندسی، بدست آمده‌اند؛ این مقادیر در جدول ۶ مشخص شده‌اند.

$$l_{ij} = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^{k} l_{ijk}},\quad m_{ij} = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^{k} m_{ijk}},\quad u_{ij} = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^{k} u_{ijk}}, \qquad (۵)$$

جدول ۶-مقادیر ادغام شده معیارهای S, O, D

خرابی	شدت‌اثر	احتمال وقوع	قابلیت تشخیص
F1	(۰.۵۷۷, ۰.۶۹۴, ۰.۷۹۵)	(۰.۴۳۶, ۰.۵۴۴, ۰.۶۴۹)	(۰.۲۰۳, ۰.۲۹۷, ۰.۴۲۵)
F2	(۰.۵۷۷, ۰.۶۹۴, ۰.۷۹۵)	(۰.۳۵۲, ۰.۴۶۶, ۰.۵۷۳)	(۰.۲۱۵, ۰.۲۸۶, ۰.۴۲۵)
F3	(۰.۴۵۳, ۰.۵۶, ۰.۶۶۴)	(۰.۳۸۲, ۰.۴۹, ۰.۵۹۵)	(۰.۲۳۸, ۰.۳۷۳, ۰.۵۰۸)
F4	(۰.۵۷۲, ۰.۶۷۴, ۰.۷۷۶)	(۰.۲۷۴, ۰.۳۷۹, ۰.۴۸۳)	(۰.۳۵۹, ۰.۴۷۶, ۰.۶۴)
F5	(۰.۴۶۵, ۰.۵۷۵, ۰.۶۸۱)	(۰.۳۲, ۰.۴۲۸, ۰.۵۳۳)	(۰.۲۲۴, ۰.۳۴۷, ۰.۴۶۹)
F6	(۰.۴۱۴, ۰.۴۸۳, ۰.۶۰۸)	(۰.۲۳۱, ۰.۲۸۳, ۰.۴۰۱)	(۰.۲۲۴, ۰.۳۱۱, ۰.۴۳۳)
F7	(۰.۶۴, ۰.۷۸۵, ۰.۸۵)	(۰.۲۳۴, ۰.۳۴۶, ۰.۴۵۲)	(۰.۲۰۳, ۰.۲۹۷, ۰.۴۲۵)
F8	(۰.۷۴۹, ۰.۸۶۴, ۰.۹۵۰)	(۰.۱۷۴, ۰.۲۷۸, ۰.۳۸)	(۰.۱۸۴, ۰.۲۲۷, ۰.۳۹۲)
F9	(۰.۶۱۶, ۰.۷۲۸, ۰.۸۳۸)	(۰.۱۸۴, ۰.۲۹۶, ۰.۴۰۳)	(۰.۲۳۸, ۰.۳۳۵, ۰.۴۶۹)
F10	(۰.۴۴۸, ۰.۵۶۴, ۰.۶۰۲)	(۰.۳۳۸, ۰.۴۴۵, ۰.۵۴۹)	(۰.۱۹۲, ۰.۲۷۶, ۰.۳۹۲)

پس از ادغام نظرات خبرگان و محاسبه مقادیر نهایی سه معیار شدت‌اثر، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص برای هرحالت شکست، عدد اولویت ریسک فازی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه و پس از آن مقادیر فازی‌زدایی شده آن‌ها با استفاده از رابطه (۴) بدست می‌آیند. با استفاده از مقادیر بدست آمده برای عدد اولویت ریسک فازی‌زدایی شده، رتبه‌بندی حالات خرابی از بزرگ‌ترین مقدار به کوچک‌ترین مقدار انجام شده است. همچنین با استفاده از این مقادیر، سطح ریسک‌های مختلف با توجه به جدول ۵ مشخص شده‌اند.

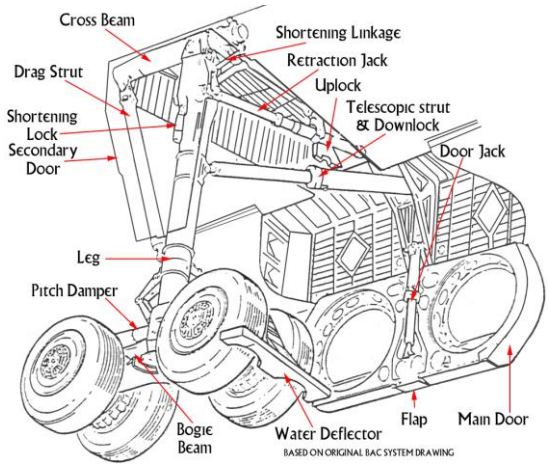
نتایج نهایی این تحقیق در جدول ۷ مشخص شده‌اند و همچنین تحلیل‌های بیشتر در خصوص نتایج بدست آمده در ادامه ارائه می‌شوند.

جدول ۷-نتایج نهایی تحقیق

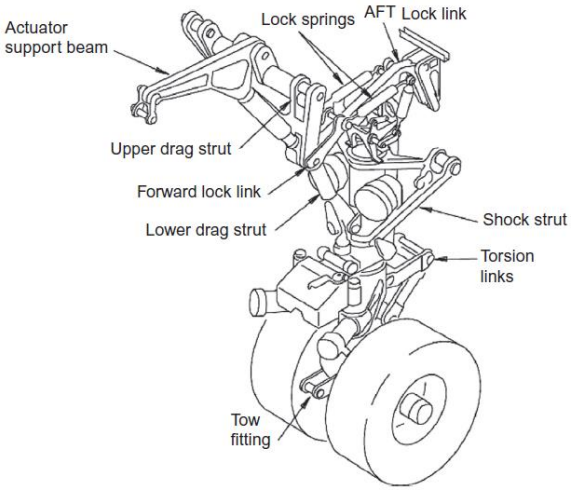
خرابی	Fuzzy-RPN	Def-RPN	سطح ریسک	رتبه
F1	(۰.۰۵۱ ،۰.۱۱۲ ،۰.۲۱۹)	۰.۱۲۳۵	خیلی زیاد	۲
F2	(۰.۰۴۴ ،۰.۰۹۲ ،۰.۱۹۴)	۰.۱۰۵۵	زیاد	۴
F3	(۰.۰۴۱ ،۰.۱۰۲ ،۰.۲۰۱)	۰.۱۱۱۵	زیاد	۳
F4	(۰.۰۵۶ ،۰.۱۲۱ ،۰.۲۴۰)	۰.۱۳۴۵	خیلی زیاد	۱
F5	(۰.۰۳۳ ،۰.۰۸۵ ،۰.۱۷۰)	۰.۰۹۳۳	متوسط	۵
F6	(۰.۰۲۱ ،۰.۰۴۲ ،۰.۱۰۵)	۰.۰۵۲۵	خیلی کم	۱۰
F7	(۰.۰۳۰ ،۰.۰۸۱ ،۰.۱۶۳)	۰.۰۸۸۸	متوسط	۶
F8	(۰.۰۲۴ ،۰.۰۵۴ ،۰.۱۴۱)	۰.۰۶۸۳	کم	۹
F9	(۰.۰۲۷ ،۰.۰۷۲ ،۰.۱۵۸)	۰.۰۸۲۳	متوسط	۷
F10	(۰.۰۲۹ ،۰.۰۶۹ ،۰.۱۲۹)	۰.۰۷۴	کم	۸

باتوجه به نتایج بدست آمده در جدول ۷، در رتبه‌های اول و دوم بحرانی‌ترین خرابی‌های موثر در وقوع حوادث و سوانح وخیم هوانوردی غیرنظامی ایران، شکستن قطعه Torsion link (F_4) و همچنین خرابی‌های متداول در سیستم ارابه‌های فرود (F_1) قرار دارند. فرود و برخواست را می‌توان مهم‌ترین مراحل یک پرواز از یک فرودگاه به فرودگاهی دیگر معرفی کرد؛ بخش اعظم وقایع هوانوردی نیز در یکی از این دو مرحله اتفاق افتاده‌اند. یکی از مهم‌ترین سیستم‌ها و تجهیزات هواپیما که در این دو مرحله درگیر هستند سیستم ارابه‌های فرود است. در اکثر هواپیماهای امروزی این سیستم از دو بخش سیستم ارابه فرود اصلی که عموما در بخش میانی و عقبی هواپیما قرار دارند و می‌توانند شامل چندین ردیف از چرخ‌ها و اتصالات باشند؛ و همچنین، سیستم ارابه فرود دماغه که در نوک هواپیما قرار دارد، تشکیل شده‌اند؛ و همچنین هرکدام از این سیستم‌ها دارای چندین زیر سیستم هستند. این سیستم وزن سنگین هواپیما و فشار عظیم هنگام فرود و برخواست را تحمل کرده و مانع از برخورد بدنه با زمین می‌شود. شکل ۶ شماتیک ساده از سیستم ارابه‌های فرود اصلی هواپیماهای امروزی را نشان می‌دهد.

همانگونه که در شکل ۶ دیده می‌شود، این سیستم به طورکلی متشکل از اتصالات جمع‌کننده و بازکننده، چرخ‌ها و ترمزها، بخش‌های هیدرولیکی، قطعات درب متصل به بدنه هواپیما و سایر قطعات داخلی است که به طور پیچیده‌ای در هواپیماهای امروزی تشکیل سیستم ارابه‌های اصلی فرود را می‌دهند. در ادامه، شکل ۷ نیز شماتیک ساده‌ای از سیستم ارابه‌های فرود دماغه را با اجزای تشکیل‌دهنده آن نشان می‌دهد [13].



شکل ۶-شماتیک ارابه فرود اصلی



شکل ۷- شماتیک ارابه فرود دماغه

این سیستم نیز از اجزای تقریبا مشابهی با سیستم ارابه‌های فرود اصلی تشکیل شده است. با توجه به ساختار پیچیده‌ای که این سیستم‌ها دارند، نقصان و خرابی‌های بوقوع پیوسته برای آن‌ها نیز می‌توانند به اشکال گوناگون و به دلایل مختلف ظهور پیدا کند. از منظر دیگر، در شکل ۸ ساختار و خصوصیات قطعه Torsion link مشخص شده است؛ همچنین این قطعه در برخی مدل‌های هواپیما به عنوان قطعه Torque link شناخته می‌شود.

شکل ۸- قطعه Torsion (torque) link

این قطعه متشکل از اجزایی است که سیلندرهای داخلی و خارجی مکانیزم ارابه فرود را به هم متصل و از پیچش یا چرخش بین اجزای سیلندر و پیستون در سازه جلوگیری می‌کنند. یکپارچگی این جزء برای جلوگیری از ارتعاشات در ارابه فرود هواپیما ضروری است. برخی از خرابی‌ها و علل متداول ایجاد آن‌ها در سیستم کلی ارابه‌های فرود عبارتند از:

- تعمیرات یا نگهداری نامناسب
- استفاده از قطعات فرسوده فراتر از حد مجاز خدماتشان
- نصب نامناسب قطعات
- ایمن کردن قطعات به صورت نامناسب
- استفاده از قطعات غیر استاندارد یا تایید نشده
- خرابی یا خستگی قطعات
- پارگی در لوله‌های سیستم هیدرولیک.
- خرابی قطعات سیستم الکترونیکی، رله‌ها، کنتاکتورها و یا محرک‌ها.
- نقص در سیستم‌های هشدار دهنده.
- باز نشدن سیستم Uplock jack.
- درگیر نشدن سیستم Downlock.
- معلق ماندن یا گیرکردن چرخ‌ها در محفظه محل قرارگیری.
- عدم روانکاری.
- کمبود یا فقدان مایع هیدرولیک.

۵- نتیجه‌گیری

باتوجه به گسترش و نیاز روزافزون به حمل و نقل هوایی، مقوله ایمنی در این صنعت به عنصری حیاتی تبدیل شده است. بدین منظور، هرگونه خطا یا خرابی بوقوع پیوسته باید به طور جدی در نظر گرفته، بررسی شده و برای جلوگیری از رخ دادن موارد مشابه، اقدامات لازم انجام شوند. بخش بزرگی از سوانح و حوادث در هوانوردی غیرنظامی ناشی از دلایل فنی و ماشینی مرتبط با هواپیما هستند. لذا در این تحقیق، خرابی‌ها و عدم کارکردهای دخیل در بروز حوادث و سوانح وخیم هوانوردی غیرنظامی ایران که شامل ۱۰ مورد بودند با استفاده از تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی در محیط فازی، رتبه‌بندی و از نظر ریسک، تعیین سطح شدند. بحرانی‌ترین حالات شکست تعیین شده توسط این تکنیک مرتبط با سیستم ارابه‌های فرود هواپیما بودند که برخی از موارد جزئی و علل ایجاد آن‌ها در انتهای بخش ۴ ذکر شدند.

با توجه به گستردگی و پیچیدگی مبحث سوانح هوایی، رویکردها و تکنیک‌های مورد استفاده برای تحلیل آن‌ها نیز بالطبع از طیف گسترده‌ای برخوردار هستند. لذا برای مطالعات آتی در این حوزه، این پژوهش پیشنهاد می‌کند که با استفاده از تکنیک‌های واکاوی متن، به بررسی گزارشات سوانح و حوادث پرداخته و هرگونه اطلاعات مفیدی که با این تکنیک قابل استخراج است، شناسایی شوند. همچنین از دیدگاه مدیریتی و به عنوان خروجی این تحقیق، با انجام موارد ذیل، امید است که از وقوع موارد مشابه در آینده جلوگیری شود. برخی از این توصیه‌ها عبارتند از:

- آموزش منظم و مناسب کارکنان بخش‌های مختلف
- اجرا و نظارت دقیق فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات به خصوص برای بخش سیستم‌های ارابه فرود.
- نوسازی ناگوان هوایی با استفاده از هواپیماهای مدرن با عمر پایین.
- تلاش برای تامین قطعات مورد نیاز در زمان مناسب.
- اصلاح ساختارهای نامناسب مدیریتی و سازمانی.

لازم به ذکر است که خرابی‌های بررسی شده در این تحقیق به صورت موردی و عنوان‌وار بوده‌اند؛ لذا بررسی‌های جزئی‌تر و تخصصی‌تر توسط خبرگان و متخصصین این حوزه در مورد هریک از این حالات خرابی قابل انجام است و می‌توانند منجر به نتایج قابل توجهی شوند.

مراجع

[۱] ع. نایبی و م. رمضانی زاده، (۱۳۹۴). «مطالعه مدل فعلی بررسی سوانح هوایی نظامی و ارائه مدلی نو با استفاده از روشهای جدید ارائه شده جهت بررسی سوانح»، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی هوانوردی*، ۱۷، ۱، ص ۳۷-۵۴.

[2] ICAO. (1994). Aircraft accident investigation: Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation. (8th ed.). Montreal: International Civil Aviation Organisation.

[3] ICAO. 2013. Aviation Occurrence Categories, Definitions and Usage Notes (4.6). Montreal: Common Taxonomy Team, ICAO.

[٤] م. مروی نام و م. بخشنده و م. خیراندیش، (۱۳۹۰). «الگوی عوامل موثر در بروز سوانح هوایی»، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی هوانوردی*، ۱۳، ۲، ص ۷۱-۷۸.

[5] J. Reason, Human Error. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press. 1990.

[6] Nazeri, Zohreh, George Donohue, and Lance Sherry. "Analyzing relationships between aircraft accidents and incidents." Proceedings of the International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2008), Fairfax, WV, USA. 2008.

[7] H. W. Heinrich, Industrial Accident Prevention. New York. McGraw- Hill. 1931.

[۸] ع. آذر و ح. فرجی، (۱۳۹۲). «علم مدیریت فازی». مرکز مطالعات مدیریت و بهره‌وری در ایران.

[9] Ching-Liang, Ch., Chiu-Chi, W. (1999). Failure Mode and Effects Analysis Using Fuzzy Method and Grey Theory.Kybernetes, 28(9), 1072-1080.

[10] Bowles, J. B., & Peláez, C. E. (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. Reliability Engineering & System Safety, 50(2), 203-213.

[۱۱] ا. کیابد و س. امیرشاکرمی، (۱۳۸۷). «خطرات کار در کارگاه های ساختمانی»، *نخستین همایش ملی ایمنی در کارگاه های ساختمانی*، ۱۴ و ۱۵ آذر، موسسه تحقیق و توسعه خانه عمران ایران، تهران.

[۱۲] ا. توکلی، و پ. علوی طبری، (۱۳۹۱). «طراحی مدل تلفیقی تصمیم گیری چند معیاره فازی جهت انتخاب طرح جانمایی تسهیلات. » *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۲(۳)، ص ۵۷-۸۴.

[13] Ossa, Edgar A., and Marco Paniagua. "Suspension and landing gear failures." Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries. Butterworth-Heinemann, 2016. 167-190.