هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

تحلیل سوانح پهپاد به روش تحلیل درخت خرابی

جلال راعی[۱]، محمود فلاحت نیا*[۲]

۱- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران، raee.jalal@ssau.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا-سوانح هوایی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران، falahatnia.mahmood@gmail.com

چکیده

این مقاله تلاش می‌نماید تا به منظور ایمن سازیِ پرواز هواپیماهای بدون سرنشین و با استفاده از روش تحلیل درخت خرابی (FTA)، از منظر قابلیت اطمینان و ایمنی و با بررسی میدانی به بررسی علل و حلقه های بروز سانحه در هواپیمای بدون سرنشین پرداخته شود و این امکان را برای بهره‌برداران و حتی مدیران ارشد فراهم نماید تا با شناسایی و درک به موقع عوامل خطرآفرین در عملیات پهپادها و قبل از وقوع سوانح، چاره اندیشی‌ها و تصمیمات لازم را در خصوص انجام اقدامات پیشگیرانه و ایمنی اتخاذ نمایند؛ همچنین در صورت دسترسی به سوابق و داده‌های آماری مربوط به سوانح پهپادی به وقوع پیوسته و با استفاده از گیت‌هایِ منطقی موجود در مدل ارائه شده از درخت رویداد، محاسبه احتمال وقوع رویداد سانحه پهپاد نیز امکان‌پذیر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: درخت وقوع خرابی، هواپیمای بدون سرنشین، قابلیت اطمینان، ایمنی

مقدمه

روش‌های تحلیل ایمنی سیستم معمولا شامل: تحلیل درخت وقوع خرابی (FTA)، تحلیل درخت رویداد (ETA) و ارزیابی‌های ریسک احتمالی می‌باشند. از تحلیل درخت خرابی برای اجرای ارزیابی خطر وظیفه‌ای استفاده می‌گردد و طی ارزیابی، مهندسان ایمنی خصوصیات طراحی غیر قابل قبول را شناسایی می‌کنند و تغییرات طراحی را پیشنهاد می‌کنند که تاثیرات وقوع خرابی را تخفیف می‌دهد و الزامات ایمنی را برآورده می‌سازد. ایده این کار عبارت است از اینکه ابتدا وقوع خرابی‌هایی در سطح سیستم شناسایی شود که ممکن است منجر به مرگ و میر یا از دست رفتن تجهیزات گردد و سپس برای هر یک از این وظایف مهم، مهندس ایمنی یا مهندس قابلیت اطمینان، یک تحلیل وظیفه‌ای در مورد اینکه سیستم در شرایط بهره‌برداری عادی عمل می‌کند را انجام می‌دهد و سپس تعیین نماید که کدام مُدهای وقوع خرابی می‌توانند منجر به وقوع خرابی وظیفه‌ای بحرانی سیستم شوند که این مدل ساخته شده معمولا درخت خرابی نام دارد [۱].

وقوع خرابی ، خرابی و خطا

در این مقاله کلیه واژگان مرتبط با حوزه مهندسی قابلیت اطمینان از واژه نامه کمیته فنی قابلیت اعتماد IEC/TC56 گرفته شده است. با این حال تفاوت بین وقوع خرابی، خرابی و خطا برای بررسی درخت خرابی، در اینجا ضرورت دارد.

وقوع خرابی یعنی پایان توانایی قلم برای انجام وظیفه الزامی [۲]. همیشه وقوع خرابی به وظیفه الزامی مربوط است. اغلب وظیفه با عملکرد مورد نیاز مشخص می‌شود. یک وقوع خرابی هنگامی رخ می‌دهد که وظیفه قابل انجام نباشد یا عملکرد خارج از الزامات عملکردی باشد. وقوع خرابی یک رخداد است که در یک نقطه خاص از زمان رخ می‌دهد. همیشه نمی‌توان زمان وقوع خرابی را مشاهده کرد. به ویژه زمانی که:

وظیفه به آرامی در حال بدتر شدن است.

وظیفه غیرفعال است (مانند: سیستم‌های ایمنی) [۳].

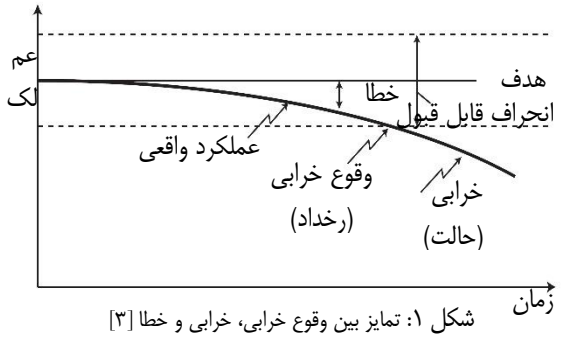
خرابی یعنی وضعیت یک قلم که با ناتوانی در انجام یک وظیفه الزامی مشخص می‌شود [۲]. در حالی که وقوع خرابی رخدادی است که در یک نقطه خاص از زمان رخ می‌دهد، خرابی حالتی است که برای مدت کوتاه‌تر یا طولانی‌تر ادامه خواهد داشت. در بیشتر موارد، یک قلم پس

*نویسنده پاسخگو: falahatnia.mahmood@gmail.com

از بروز خرابی سخت‌افزاری دچار وقوع خرابی می‌شود، گفته می‌شود که قلم در وضعیت خراب است.

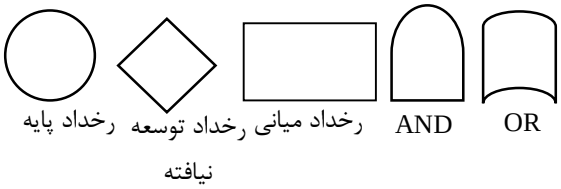
همچنین خطاهای طراحی و نصب می‌تواند مانع از انجام وظیفه الزامی قلم شود. قلم دارای یک خرابی است که قبل از آن هیچ وقوع خرابی سخت افزاری وجود ندارد و این خرابی، یک خرابی سیستماتیک نامیده می‌شود.

خطا یعنی اختلاف بین یک مقدار محاسبه شده، مشاهده شده یا اندازه گیری شده و مقدار واقعی [۳]. شکل ۱ تمایز بین وقوع خرابی، خرابی و خطا را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تمایز بین وقوع خرابی، خرابی و خطا [۳]

نمادهای مورد استفاده در درخت وقوع خرابی



شکل ۲: نمادهای رخداد درخت خرابی

درخت خرابی از سه نوع گره تشکیل می‌یابد: نمادهای رخدادها، گیت‌ها و انتقال. نمادها در درخت‌های خرابی استاندارد برای ارائه رخدادهای مختلفی استفاده می‌شوند که در شکل ۲ نشان داده شده است:

الف) رخداد پایه یک خرابی اولیه یا پایه است که نیاز به توسعه یا گسترش بیشتر ندارد و به طور گرافیکی به صورت دایره نشان داده می‌شود. رخدادهای پایه به عنوان گره‌های برگ در درخت خرابی هستند و آنها با رخدادهای میانی ترکیب می‌شوند. برای سهولت در تحلیل کمی رخدادهای پایه معمولا نرخ‌های وقوع خرابی و/یا نرخ های تعمیر داده می‌شود. در تحلیل کیفی، مجموعه برش‌های حداقلی (MCS)[۱] ترکیبی از رخدادهای پایه مختلف هستند.

ب) رخداد میانی یک خرابی ناشی از ترکیب منطقی سایر رخدادها است که در پایین درخت به وقوع می‌پیوندد؛ از آنجایی که رخدادهای میانی توسط رخدادهای دیگر ایجاد می‌شوند، تقریباً همیشه یک نوع گیت منطقی می‌باشند.

ج) رخداد توسعه نیافته، رخدادی است که مشارکت‌های آن در تحلیل در نظر گرفته نمی‌شود (یا به این دلیل که غیرضروری در هستند و یا به این دلیل که اطلاعات کافی در دسترس نمی باشد) و به صورت گرافیکی با یک الماس نشان داده می‌شود.

د) رخداد شرطی، لزوماً نشان دهنده یک خرابی نیست، بلکه به عنوان یک شرط یا محدودیت خاص برای انواع خاصی از گیت‌ها عمل می‌کند. بیضی برای نشان دادن یک رخداد شرطی استفاده می‌شود.

ه) رخداد عادی، نشان دهنده هیچ عیب نیست و بخشی از رفتار اسمی سیستم می باشد و با نماد خانه نمایش داده می شوند.

این مقاله تلاش می‌نماید با استفاده از روش تحلیل درخت وقوع خرابی، به ارائه مدلی تحلیلی در سوانح هواپیماهای بدون سرنشین بپردازد و با نگاهی ریشه‌ای، ضمن بررسی علل و حلقه‌های موثر بر کاهش قابلیت اطمینان در دو حوزه هواپیمای بدون سرنشین و عوامل انسانی مرتبط با این نوع از ماشین‌های پرنده، به ارتباط و نقش این دو رخداد بالا[۲](که در این مقاله برای سهولت، سرشاخه نامیده می‌شود) در بروز سانحه هواپیماهای بدون سرنشین پرداخته و این امکان را برای بهره‌برداران و حتی مدیران ارشد فراهم نماید تا با شناسایی و درک به موقع عوامل خطرآفرین در عملیات پهپادها و قبل از وقوع سوانح، چاره اندیشی‌ها و تصمیمات لازم را در خصوص انجام اقدامات پیشگیرانه و ایمنی اتخاذ نمایند.

تحلیل درخت خرابی استاندارد

تحلیل درخت‌های خرابی استاندارد معمولاً در دو سطح کیفی و کمی انجام می‌شود. پس از ایجاد یک درخت خرابی استاندارد، مجموعه برش‌های حداقلی معمولاً با انجام تحلیل کیفی به دست می‌آیند. هر MCS می‌تواند شامل یک رخداد واحد یا چندین رخداد باشد که توسط گیت‌های منطقی ترکیب شده‌اند. ترتیب یک مجموعه برش‌های حداقلی، تعداد رخدادهای اساسی را که در آن مجموعه برش‌های حداقلی نقش دارند را مشخص می‌کند. یک MCS مرتبه اول، از یک رخداد اصلی تشکیل شده است؛ به عنوان مثال: یک رخداد وقوع خرابی به تنهایی می‌تواند باعث خرابی سیستم شود. بنابراین، این جزء واحد کاندیدای ارتقا یا تکرار می‌شود؛ از سوی دیگر، یک MCS مرتبه چهارم، شامل چهار رخداد اساسی است. هر چه ترتیب یک MCS کمتر باشد، اهمیت آن MCS بیشتر است. الگوریتم های زیادی برای انجام تحلیل کیفی درخت‌های خرابی وجود دارد. فهرست جامعی از این الگوریتم ها در مرجع [۴] موجود است که شرح جزئیات این الگوریتم‌ها خارج از محدوده این مقاله است.

امکان ارزیابی احتمال وقوع سانحه پهپاد و روابط حاکم بر درخت تحلیل خرابی

۱Minimum Cut Sets (MCS)

۲Top Event

در صورت وجود دسترسی به بانک داده‌ها در رویدادهایِ به وقوع پیوسته قبلی و محاسبه درصد احتمال وقوع هر یک از این رویدادهای پایه[۱] امکان محاسبه احتمال رویداد سانحه پهپاد با استفاده از روابط ریاضی و گیت‌های منطقی AND و OR ارائه شده در این مدل تحلیل درخت رویداد میسّر خواهد بود.

بنابراین روابط (۱) و (۲) مورد استفاده از مراجع [۵] و [۶] و [۷] و [۸] و [۹] در درخت رویداد سانحه پهپاد و محاسبه احتمال رویدادهای خروجی از گیت های AND و OR در هر یک از مجموعه برش‌های حداقلی به ترتیب عبارت خواهند بود از:

$$P_{and}(Y) = \prod_{i=1}^{n} P(Y_i) \qquad (۱)$$

که در آن:

$P_{and}(Y)$ احتمال رویداد خروجی Y از دریچه AND می‌باشد.

n تعداد رویدادهای پایه –ورودی مستقل – می باشد.

$P(Y_i)$ احتمال رویداد ورودی Y_i برای $i=1,2,3,\ldots,n$ می‌باشد.

$$P_{or}(Y) = 1 - \prod_{i=1}^{n}\left(1 - P(Y_i)\right) \qquad (۲)$$

که در آن:

$P_{or}(Y)$ احتمال رویداد خروجی Y از دریچه OR می باشد.

درخت تحلیل وقوع سانحه پهپاد –که در نمودارهای شکل(۱) تا (۱۰) تدوین و ارائه شده است– حاصل استفاده از تجارب میدانی و عملی محقق و انطباق و ادغام آن با کتب علمی و چک لیست‌های پروازی پهپاد می‌باشد که در آن صرفا رویدادهای سانحه خیز پایه مربوط به عملیات پروازی پهپاد مورد بررسی قرار گرفته است و لذا از رویدادهای پایه منجر به وقوع سانحه پهپاد که ناشی از محموله های پهپادی هستند (اعم از محموله های رزمی، شناسایی و ...) صرف نظر شده است.

درخت تحلیل وقوع سانحه پهپاد

طبق تعریف، قابلیت اطمینان عبارت است از: "احتمال آنکه یک قلم/تجهیز/سیستم بتواند در بازه زمانی معینی وظیفه الزام شده خود را بدون وقوع خرابی انجام دهد " [۵] و [۶] و [۱۰].

هرچند ممکن است که در اذهانِ عموم مردم، عبارات "قابلیت‌اطمینان انسانی[۲]" و " خطای انسانی[۳]" معنای یکسانی داشته باشد اما وجه تمایز آن‌ها در شرایط خاص می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد؛ بنابراین، تفاوت اساسی آن‌ها در تعاریف به وضوح معلوم می‌گردد، یعنی قابلیت اطمینان انسانی عبارت است از: " احتمال آن که یک کار[۴]یا وظیفه[۵] توسط یک شخص در مراحل مشخصی از عملیات سیستم و در یک محدوده زمانی حداقلی، به طور موفقیت آمیزی انجام و تکمیل گردد" [۱۵]. از سوی‌دیگر، تعریف خطای انسانی عبارت است از: " واماندگی یا قصور[۶]شخص در انجام یک وظیفه معلوم – و یا حتی انجام دادن یک فعالیت ممنوع شده – که می‌تواند باعث آسیب رسانیدن به تجهیزات و اموال یا قطع شدن فعالیت‌های برنامه ریزی شده در سیستم گردد" [۱۱].

همانطور که در شکل۳ ملاحظه می‌گردد، وقوع سانحه پهپاد به عنوان رویداد نهایی از دو رخداد سطح پایین‌تر یعنی کاهش قابلیت اطمینان هواپیمای بدون سرنشین (یا) کاهش قابلیت اطمینان انسانی در پهپاد تشکیل یافته است به طوریکه هر یک از این رخدادها خود به عنوان سر شاخه –با نماد مستطیل– نمایش داده شده‌اند و از ترکیب زیر شاخه‌ها به وسیله گیت‌های منطقی AND و OR تشکیل شده است.

همچنین ریشه‌های درخت وقوع سانحه معرفی شده در این مقاله از رویدادهای پایه و با نماد دایره تشکیل یافته است که وقوع هر یک از آن‌ها به صورت مستقل از یکدیگر می‌باشد.

طبق مدل ارائه شده در شکل ۳ این مقاله، در وقوع سانحه یک هواپیمای بدون سرنشین دو عامل اصلی نقش دارد که عبارتند از:

کاهش قابلیت اطمینان انسانی (یا) کاهش قابلیت اطمینان پهپاد؛

برابر بررسی‌های به عمل آمده، علل اصلی که منجر به کاهش قابلیت اطمینان انسانی در هواپیماهای بدون سرنشین می‌گردد و در شکل ۳ با شماره ۱ نامگذاری شده و زیر مجموعه های آن عبارت است از رویدادهای شماره ۳، ۴، ۵ و ۶ یعنی:

۳– عدم انجام تعمیرات کافی توسط تیم فنی– نگهداری: اشتباهات ناشی از کمبود کارکنان فنی (یا) عدم اجراء صحیح دستورالعمل‌ها و قوانین نگهداری (یا) وجود ضعف/خطا در بازرسی‌های پیشگیرانه (یا) عوامل موثر بر سلامت روانی کارکنان فنی یا وجود ضعف در مهارت عملی (یا) وجود ضعف در دانش علمی (یا) خطای حین نصب (یا) تاثیر ضریب امگا[۳])؛

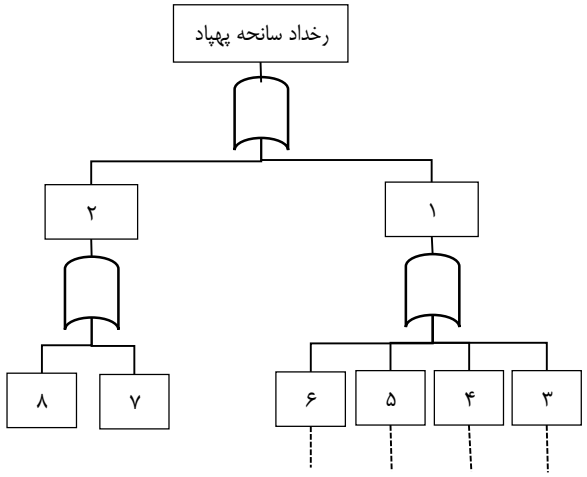
۴– عدم برقراری ارتباط رادیویی بین خلبان و برج مراقبت: ضعف در انجام دقیق‌وکامل مکالمات رادیویی برابردستورالعمل‌های مصوب (یا) عدم طراحی/عدم تعبیه سامانه ارتباط رادیویی مناسب)؛

۵– عدم وجود همکاری مناسب بین خلبان و خدمه نگهداری (ناشی از: عدم وجود قوانین شفاف تدوین شده (یا) وجود عوامل موثر بر سلامت روانی کارکنان پروازی و نگهداری)؛

۶– خطای خلبان و اعمال فرامین اشتباه به پهپاد (ناشی از: تحلیل و درک اشتباه خلبان از وضعیت پهپاد (یا) عدم توجه خلبان به سامانه‌های هشداری و آلارم‌ها)؛

۱Basic Event
۲Human Reliability
۳Human Error
۴Job
۵Task
۶Failure

از سوی دیگر و طبق بررسی های به عمل آمده، در شکل ۳ عوامل موثر بر کاهش قابلیت اطمینان پهپادی از دو زیر شاخه اصلی تشکیل می‌یابد که در صورت وقوع هر یک از این دو عامل، سبب کاهش R هواپیمای بدون سرنشین می‌گردد که عبارتند از:



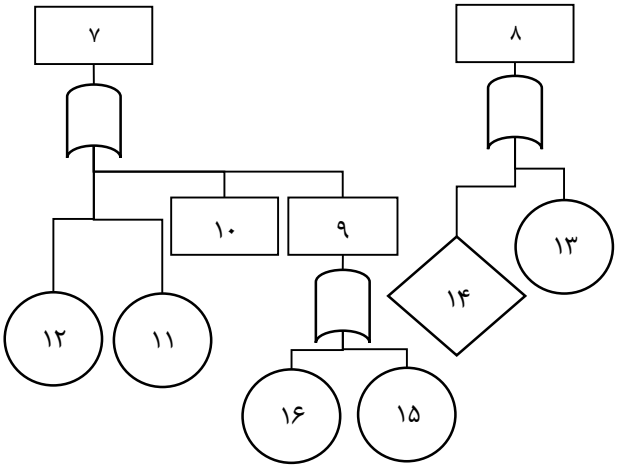
شکل ۳: درخت رویداد سانحه در هواپیماهای بدون سرنشین

طبق شکل ۴ سرشاخه‌های ۷- عوامل قابل کنترل (یا) ۸- عوامل غیر قابل کنترل قرار می گیرند که در آن:

زیر شاخه‌های ۷ (یعنی عوامل قابل کنترل) عبارتند از:

۹- خطای خلبان در موقع فرود (یا) ۱۰- بروز وضعیت اضطراری در پرواز (یا) ۱۱- خرابی سامانه ارتباط رادیویی بین خلبان و برج مراقبت پرواز (یا) ۱۲- خرابی ایستگاه کنترل زمینی پهپاد؛

و زیر شاخه ۸ (یعنی عوامل غیرقابل کنترل) عبارتند از:



شکل ۴: عوامل قابل کنترل و غیر قابل کنترل کاهش قابلیت اطمینان

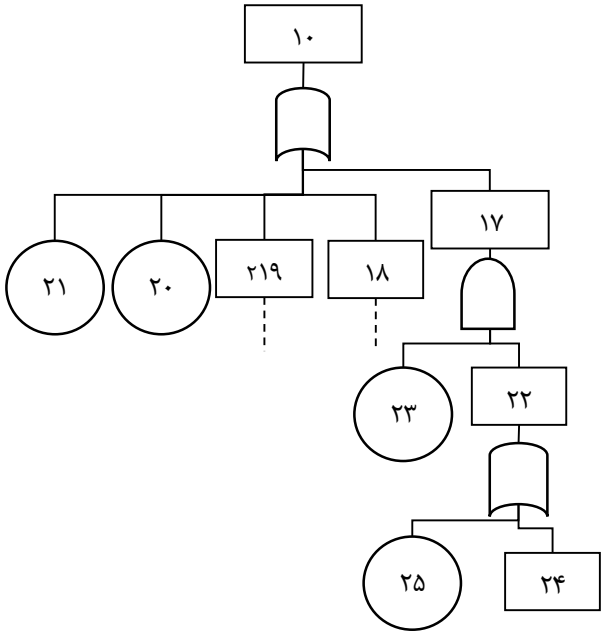
همچنین طبق مدل ارائه شده در شکل ۴ زیر شاخه ۹ (یعنی خطای خلبان در کنترل پهپاد) از دو رویداد پایه زیرین تشکیل می‌گردد:

۱۵- عدم طراحی سامانه فرود خودکار Auto Land System برای پهپاد توسط شرکت سازنده (یا) ۱۶- وقوع خرابی در سامانه فرود خودکار Failure in Auto Land System؛ تشکیل شده است که در صورت وقوع هریک از آنها وقوع خطای کنترلی توسط خلبان امکان‌پذیر می‌گردد.

هر یک از علل اصلی فوق در شکل ۳ و شکل ۴، خود ناشی از رخدادهایی در مجموعه برش‌های حداقلی زیرین و پایین دستی می‌باشند که درخت تحلیل وقوع سانحه، چگونگی ارتباط و منطق ریاضی حاکم بر آنها را با گیت‌های منطقی یا (OR) / و (AND) ترسیم و تبیین می‌نماید.

بررسی کتب پروازی و سوانح به وقوع پیوسته –مطالعه موردی: پهپاد - بیانگر آنست که طبق شکل ۵ به وقوع پیوستن سرشاخه ۱۰ (یعنی بروز وضعیت اضطراری) در حین پرواز هواپیماهای بدون سرنشین می‌تواند ناشی از وقوع یکی از رخدادهای زیر باشد:

۱۷- گم شدن UAV (یا) ۱۸- خرابی سازه در اثر FOD (یا) ۱۹- خرابی سامانه تامین توان الکتریکی (یا) ۲۰- خرابی سامانه مدیریت پرواز (یا) ۲۱- خرابی سامانه موتور؛



شکل ۵: ایجاد وضعیت اضطراری در پرواز

در ادامه، به وقوع پیوستن سرشاخه ۱۷ (یعنی گم شدن UAV) می‌تواند ناشی از وقوع یکی از رخدادهای زیر باشد:

۲۲- خرابی سامانه ناوبری پهپاد (و) ۲۳- خرابی سامانه فرستندهTx/گیرندهRx پهپاد)؛ که در آن به وقوع پیوستن سرشاخه ۲۲ (یعنی خرابی سامانه ناوبری پهپاد) می‌تواند ناشی از وقوع یکی از رخدادهای ۲۴- خرابی سامانه GPS/INS (یا) ۲۵- خرابی سامانه مدیریت پرواز FMS باشد؛

در ادامه و مطابق شکل ۶ زیر شاخه های ۲۴ (یعنی خرابی سامانه GPS/INS) عبارتند از:

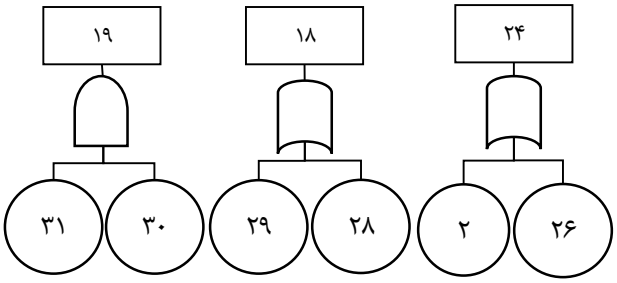
۲۶- وجود اختلال در سیگنال GPS ناشی از عدم پوشش ماهواره ایی، جمینگ، . . . (یا) ۲۷- خرابی آنتن گیرنده سیگنال GPS؛

همچنین زیر شاخه های ۱۸ (یعنی خرابی سازه در اثر FOD و برخورد شی خارجی با بدنه پهپاد) عبارتند از:

۲۸- برخورد هواپیما با افراد، تجهیزات، اشیاء، . . . بر روی باند پرواز (یا) ۲۹- برخورد هواپیما با پرندگان، موانع مرتفع، گلوله، . . . در هنگام پرواز؛

و نیز زیر شاخه های ۱۹ (یعنی خرابی سامانه تامین توان الکتریکی) عبارتند از:

۳۰- خرابی سامانه باطری (و) ۳۱- خرابی سامانه ژنراتور پهپاد)؛

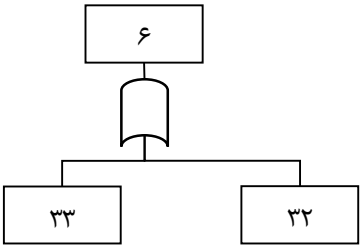


شکل ۶: خرابی سامانه‌ها و سازه

همانگونه که قبلا در شکل ۳ نشان داده شده است سرشاخه شماره ۶ (یعنی خطای خلبان و اعمال فرامین اشتباه به پهپاد) می‌تواند ناشی از: ۳۲- عدم توجه خلبان به سامانه‌های هشداری و آلارم‌ها (یا) ۳۳- تحلیل و درک اشتباه خلبان از وضعیت پهپاد باشد که در شکل۷ نمایش داده شده اند:

در ادامه مدل ارائه شده، طبق شکل ۸ به بررسی محتمل‌ترین علل اصلی سرشاخه ۶ (یعنی ارسال فرامین اشتباه توسط خلبان به پهپاد که منجر به کاهش قابلیت اطمینان انسانی می‌گردد)، پرداخته شده است؛

سرشاخه ۳۳ (یعنی تحلیل و درک اشتباه خلبان از وضعیت پهپاد) که در شکل "۸" ترسیم گردیده است متشکل از ۳۴- وجود عوامل تنش‌زا (یا) ۳۵-کم تجربه بودن خلبان (یا) ۳۷- وجود ضعف در آموزش و کمبود دانش پروازی خلبان (یا) ۳۸- وجود ضعف در طراحی سامانه هشداری

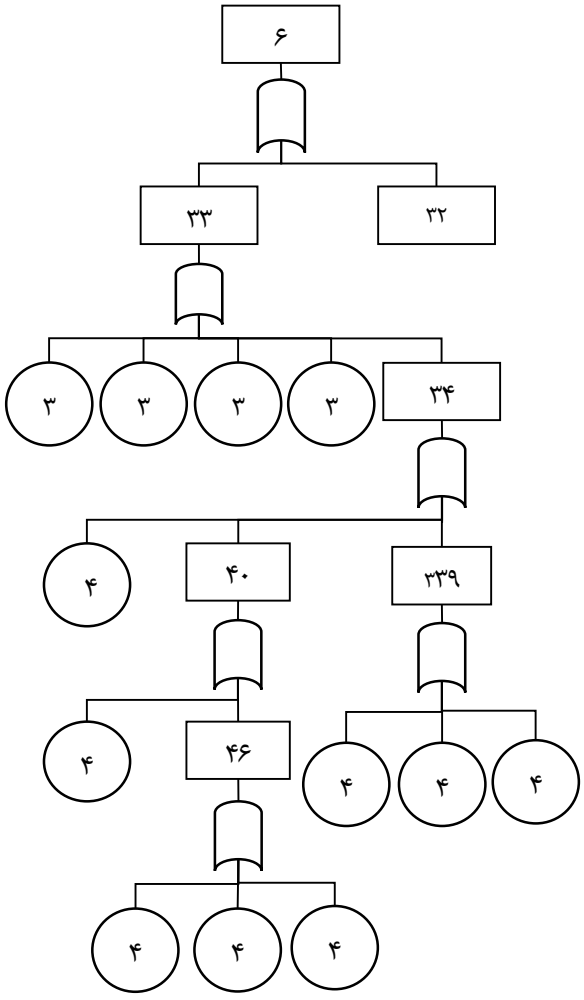


شکل ۷: ارسال فرامین اشتباه ناشی از خطای خلبان

توسط شرکت سازنده (یا) ۳۶- عدم رعایت ارگونومی مناسب در طراحی نرم افزار هدایتگر پهپاد توسط شرکت سازنده می باشد؛

سرشاخه ۳۴ یعنی وجود عوامل تنش‌زا ناشی از وقوع رخدادهای زیر می باشد:

۳۹- عوامل اثر گذار بر سلامت روانی خلبان (یا) ۴۰- عوامل اثر گذار بر سلامت جسمانی خلبان (یا) ۴۱- عوامل محیطی همانند جنگ، دمای هوا، صدا، شدت نور ...)؛



شکل ۸: ارسال فرامین اشتباه ناشی از خطای خلبان

همچنین سرشاخه ۳۹ (یعنی عوامل اثر گذار بر سلامت روانی خلبان) از وقوع موارد زیرین ناشی می گردد:

۴۲- وجود دغدغه های مالی خلبان (یا) ۴۳- وجود مشکلات عاطفی/خانوادگی خلبان (یا) ۴۴- وجود عوامل نارضایتی در محیط خدمتی خلبان؛

سرشاخه ۴۰ (یعنی عوامل اثر گذار بر سلامت جسمانی خلبان) ناشی از وقوع موارد پایین دستی زیر می‌باشد:

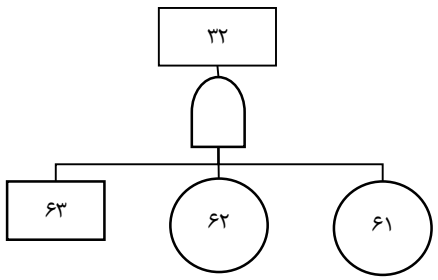
۴۵- وجود بیماری و عدم سلامت جسمانی خلبان (یا) ۴۶- وجود ضعف/خستگی خلبان؛

سرشاخه ۴۶ (یعنی عوامل موثر در وجود ضعف/خستگی خلبان) ناشی از وقوع موارد پایین دستی زیر می‌باشد که در ذیل شکل ۸ ارائه شده است و عبارتند از:

۴۷- ناکافی بودن میزان استراحت Crew Rest/ناکافی بودن میزان ساعات خواب خلبان (یا) ۴۸- طولانی شدن زمان انجام ماموریت پروازی (یا) ۴۹- وقوع وقفه های مکرر و طولانی از زمان آماده‌سازی UAV تا شروع پرواز)؛

نتایج بررسی ها نشان می‌دهد رخداد سرشاخه ۳۲ (یعنی عدم توجه خلبان به سامانه‌های هشداری و آلارم‌ها) ناشی از رخداد زیر شاخه های پایین دستی می باشد که در شکل ۹ ارائه شده و عبارتند از:

۶۱- وجود ضعف در طراحی سامانه‌های شنیداری (همچون: ضعیف بودن فرکانس صوتی، مشابه بودن فرکانس صوتی در زمانی که بیش از یک حالت اضطرای وجود داشته باشد) (یا) ۶۲- وجود ضعف در طراحی سامانه های دیداری (همچون: موقعیت، شدت نور، تنوع رنگ و متمایز بودن چراغ های هشداری بر روی نرم افزار) (یا) ۶۳- احساس ضعف/خستگی خلبان (بسط زیر شاخه های این رخداد عینا تکرار سرشاخه ۴۶ از شکل ۸ می باشد)؛



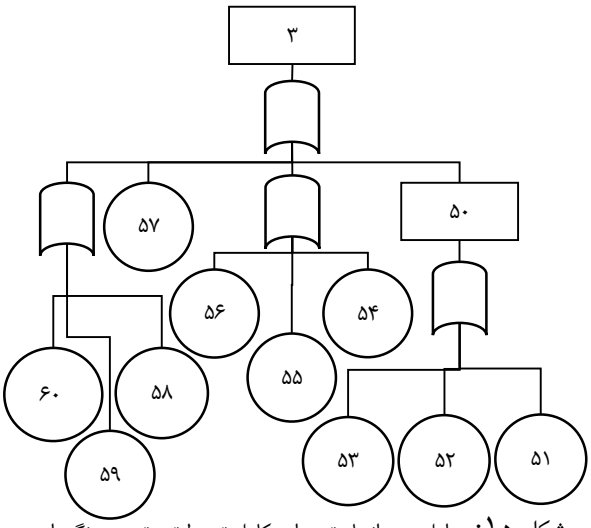
شکل ۹: عدم توجه خلبان به سامانه‌های هشداری و آلارم‌ها

وجود سرشاخه ۳ (یعنی عدم انجام تعمیراتِ کامل توسط تیم تعمیر و نگهداری پهپاد) ناشی از رخداد زیر شاخه های پایین دستی می باشد که در شکل ۱۰ ارائه شده و عبارتند از:

سرشاخه ۵۰ (یعنی عوامل اثر گذار بر سلامت روانی پرسنل تعمیر- نگهداری) ناشی از وقوع موارد پایین دستی زیر می‌باشد:

۵۱- وجود دغدغه های مالی کارکنان فنی (یا) ۵۲- وجود مشکلات عاطفی/خانوادگی کارکنان فنی (یا) ۵۳- وجود عوامل نارضایتی در محیط خدمتی کارکنان فنی)؛

همچنین طبق شکل ۱۰، سرشاخه ۵۰ از طریق گیت‌های OR با سایر رخدادهای زیر مرتبط می‌باشد که در نهایت منجر به رخداد



شکل ۱۰: عوامل عدم انجام تعمیراتِ کامل توسط تیم تعمیر و نگهداری پهپاد

بالادستی (یعنی وقوع سرشاخه ۳) می‌گردند که عبارتند از:

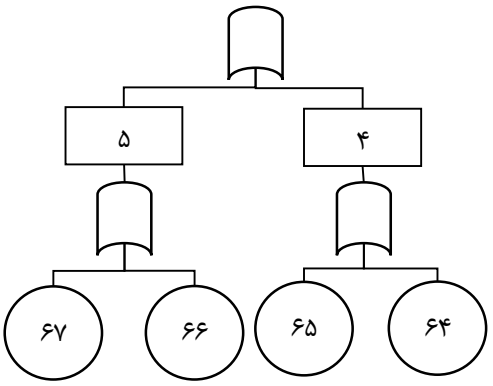
۵۴- کمبود کارکنان فنی موجود در هر واحد تعمیراتی که سبب افزایش ساعت کار محوله به هر نفر می‌گردد و نتیجتا احتمال بروز خطای فنی افزایش خواهد یافت) (یا) ۵۵- وجود ضعف در مهارت عملی/کم تجربه بودن کارکنان فنی (یا) ۵۶- وجود ضعف در دانش علمی کارکنان فنی یا ۵۷- وجود اثر ضریب تعمیرات ناکافی (تاثیر ضریب امگا [۱۲]) (یا) ۵۸- وقوع خطای حین نصب زیر سامانه‌های پهپاد (یا) ۵۹- عدم اجرای صحیح دستورالعمل‌ها و قوانین تعمیر- نگهداری توسط کارکنان فنی (یا) ۶۰- وجود ضعف/خطا در بازرسی های پیشگیرانه؛

در ادامه، بسط رخداد سرشاخه ۴ از شکل ۳ (یعنی عدم وقوع برقراری ارتباط رادیویی بین خلبان و برج مراقبت پرواز) ناشی از رخداد زیر شاخه های پایین دستی می باشد که در شکل ۱۱ ارائه شده و عبارتند از:

۶۴- وجود ضعف در انجام دقیق و کامل مکالمات رادیویی برابردستورالعمل‌های‌مصوب (یا) ۶۵- عدم طراحی/عدم تعبیه سامانه ارتباط رادیویی مناسب می باشد؛

و در نهایت، بسط رخداد سرشاخه ۵ از شکل ۳ (یعنی علل عدم وجود همکاری مناسب بین خلبان و کروی نگهداری (CrewCoordination) ناشی از رخداد زیر شاخه های پایین دستی می باشد که در شکل ۱۱ ارائه شده و عبارتند از:

۶۶- عدم وجود قوانین شفاف تدوین شده (یا) ۶۷- وجود عوامل موثر بر سلامت روانی کارکنان پروازی و نگهداری) می‌باشد که در نهایتا



شکل ۱۱: عدم وقوع برقراری ارتباط رادیویی/ عدم وجود CrewCoordination

منجر به رخداد بالادستی یعنی کاهش قابلیت اطمینان انسانی در پهپاد خواهد شد؛

نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش گردید با استفاده از روش تحلیل درخت خرابی [۷] و [۸] و [۹] و [۱۱]، از منظر قابلیت اطمینان و ایمنی به بررسی علل و حلقه‌های بروز سانحه در هواپیمای بدون سرنشین [۱۳] (بدون در نظر گرفتن عوامل مرتبط با محموله های قابل حمل توسط پهپاد) پرداخته شود که با توجه به رویکرد ایمنی مستتر در درخت FTA، می‌توان از آن به عنوان یک مرجع در حوزه شناسایی علل رخداد سوانح پهپادی بهره برداری گردد.

آنچه که در این مقاله به عنوان یک نوآوری مورد توجه قرار گرفته است ریشه‌یابی همزمان علل موثر بر کاهش قابلیت اطمینان در دو حوزه انسانی و سامانه پهپاد می‌باشد که با استفاده از مدل منطقی ارائه شده از روابط بین این علل توسط گیت‌های AND و OR، رخداد سانحه در هواپیماهای بدون‌سرنشین قابل تحلیل و بررسی شده است؛ بنابراین می‌توان چنین نتیجه گیری نمود:

نخست آنکه، الزام به کارگیری شیوه‌های نوین مدیریتی در حوزه علوم انسانی، اعم از تدوین قوانین و مقررات و یا توجه به نقش عوامل موثر در ایجاد و حفظ سلامت روانی و جسمی کارکنان فنی و کارکنان پروازی، به طور چشمگیری بر افزایش قابلیت اطمینان انسانی و کاهش احتمال رخداد سانحه در سامانه‌های پهپادی، اثرگذار خواهد بود.

دوم آنکه، الزام به استفاده از اصول و روش‌های مهندسی قابلیت اطمینان در تمامی مراحل تکوین محصول یعنی از طراحی مفهومی تا ساخت یک سامانه پهپادی، می‌تواند به طور چشمگیری باعث افزایش کیفی و ایمنی زیرسامانه‌های پهپاد –توام با نگاه صرفه‌پذیری اقتصادی– گردد که در نهایت منجر به بهبود قابلیت اطمینان سامانه پهپاد و کاهش احتمال رخداد سانحه پهپادی می‌گردد.

همچنین با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله و با فرض قابل دسترس بودن سوابق و داده‌های آماریِ مربوط به سوانح به وقوع‌پیوسته و روش مجموعه برش‌های حداقلی (MCS)، محاسبه احتمال وقوع سانحه پهپاد امکان‌پذیر می‌باشد.

مراجع

[۱] جی.ویلمرینگ ، تیموتی؛ دی.مات ، چارلز؛ راعی ، جلال ؛ مدیریت سلامت سیستم با کاربردهای هوافضایی ، انتشارات دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری ، تهران، چاپ اول ، صفحه ۱۶۳ ، بهار ۱۳۹۷.

[۲] سازمان ملی استاندارد ایران ؛ کمیسیون فنی تدوین استاندارد ؛ ISIRI-IEC 60300-3-1 ؛ مدیریت قابلیت اعتماد – قسمت۱-۳ : راهنمای کاربرد – فنون تحلیلی برای قابلیت اعتماد – راهنمایی بر روش شناسی؛ تهران ، چاپ اول ، بهمن ماه ۱۳۷۱.

[3] Rausand, Marvin and Høyland, Arnljot; System Reliability Theory– Models, Statistical Methods, and Applications, Wiley, 2004.

[4] https://research.utwente.nl/en/publications/fault-tree-analysis-a-survey-of-the-art-in-modeling-

[۵] بیرولینی ، السا ندرو ؛ راعی ، جلال ؛ حکیمی زاده ، صدف ؛ مهند سی‌قابلیت اطمینان ؛ نظریه و کاربرد ، انتشارات دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، چاپ اول ،۱۳۹۴.

[۶] بیلینتون ، روی ؛ آلن ، رونالد ؛ رضائیان ، محسن ؛ ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های مهندسی ، مفاهیم و روش ها ، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران) ، تهران، چاپ ششم ، زمستان ۱۳۹۴.

[7] Dhillon , B.S.; Reliability , Quality & Safety for Engineers , CRC , New York , 2005.

[8] Dhillon , B.S.; Applied Reliability , Quality : Fundamentals, Methods & Procedures , Springer – Verlag London Limited , 2007.

[9] Modarres , M. ; Kaminskiz , M. ; Krivstov , V. ; *Reliability Engineering and Risk Analysis : Practical Guide* , CRC Press , Boca Raton (Florida) , 1999 .

[10] Mac G , Kevin ; Adams ; non-functional Requirements in Systems Analysis and Design : Topics in Safety , Risk , Reliability and Quality , vol . 28 , Springer , International Publishing Switzerland, 2015.

[11] Dhillon , B.S.; *Human Reliability and Error in Transportation systems* , Springer Series in Reliability Engineering Department of mechanical Engineering , University of Ottawa , 2007.

[۱۲] دهقان نژاد، احمد ؛ تحلیل اثرگذاری اجزای سازمانی ساختار کنترل ایمنی صنایع تعمیر و نگهداری بر قابلیت اطمینان وسایل پرنده ؛ پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی ایمنی صنعتی؛ دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی و درمانی شهید بهشتی، دانشکده سلامت و ایمنی و محیط زیست ، تیرماه۱۳۹۴.

[13] Office of the Secretary of Defense.; *Unmanned Aerial Vehicle Reliability Study* , Department Of Defency , February 2003.