



(علمی - پژوهشی)

# مدل سازی قابلیت اطمینان پهپاد به روش مارکوف

به طور کلی روش‌های تحلیلی مختلفی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قابل تعمیر و غیرقابل تعمیر و به طور خاص پیش‌بینی وجود دارد. پیش‌بینی قابلیت اطمینان یکی از رایج‌ترین شکل‌های تحلیل قابلیت اطمینان است که برای تخمین و پیش‌بینی نرخ وقوع خرابی، قابلیت اطمینان، آمادگی و میانگین زمان-تا- وقوع خرابی قطعات و سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. مارکوف روشی برای مدل‌سازی رفتار اتفاقی سیستم‌هایی است که به طور پیوسته یا ناپیوسته نسبت به زمان و یا در فضای حالت در تغییر هستند. این پیش‌بینی‌ها در ارزیابی امکان‌سنجی طراحی، مقایسه طرح‌های جایگزین، شناسایی مناطق وقوع خرابی احتمالی، مصالحات بین عوامل طراحی سیستم و ردیابی بهبود قابلیت اطمینان کاربرد دارند. در این مقاله تلاش شده است با استفاده از روش مارکوف و به منظور قابل پیش‌بینی نمودن شاخص‌های ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم هواپیماهای بدون سرنشین (پهپاد)، مدلی بر مبنای نرخ ثابت خرابی و تعمیرات، ارائه گردد؛ همچنین روابط استخراج شده در این مقاله دارای قابلیت تعمیم‌دهی به انواع هواپیماهای بدون سرنشین می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی مارکوف، پیش‌بینی شاخص‌های قابلیت اطمینان، نرخ ثابت خرابی و تعمیرات، هواپیمای بدون سرنشین

جلال راعی<sup>۱\*</sup>، محمد نجفی<sup>۲\*\*</sup> و محمود فلاحت‌نیا<sup>۳\*\*\*</sup>

۱- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران  
 ۲- پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات، فناوری، تهران، ایران

\* استادیار (نویسنده پاسخگو)،

ایمیل: [raee.jalal@ssau.ac.ir](mailto:raee.jalal@ssau.ac.ir)

\*\* استادیار

\*\*\* کارشناسی ارشد

## Modeling Reliability of UAV by Markov Method

In general, there are various analytical methods to evaluate the reliability of repairable and non-repairable systems, and in particular prediction. Reliability prediction is one of the most common forms of reliability analysis that is used to estimate and predict failure rate, reliability, availability, and mean time-to-failure of components and the whole system. Markov is a method for modeling the stochastic behavior of systems that are continuously or continuously changing over time or in space. These predictions are used to evaluate design feasibility, compare alternative designs, identify potential failure areas, compromise system design factors, and detection/ Tracing reliability improvements. In this paper, in order to predict the reliability assessment indices in the UAVs and based on the Markov analysis method, a model based on the fixed failure and repair rates has been proposed; The derived and proposed relations in this study have the ability to generalize to other types of drone.

**Keywords:** Markov Modeling, Reliability Indices Prediction, Fixed Failure/Repair Rate, UAV

Jalal Raei<sup>\*1</sup>, Mohammad Nadjafi<sup>\*\*2</sup>, Mohammad FalahatNia<sup>\*\*\*3</sup>

1, 3- Shahid Sattari Aviation Science and Technology University, Tehran, Iran

2- Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Postal Code: 1465774111, Tehran, IRAN

\* Assistant Professor (Corresponding Author)

Email: [raee.jalal@ssau.ac.ir](mailto:raee.jalal@ssau.ac.ir)

\*\* Assistant Professor

\*\*\* M.Sc.

## مقدمه

اخیرا به پیش‌بینی به عنوان یک رشته فرعی نوظهور در مدیریت سلامت سیستم توجه زیادی شده‌است. پیش‌بینی زمانی که، یک زیرسیستم/المان یا یک آیتم دیگر نتواند وظیفه مورد نظر را انجام دهد. عدم انجام وظیفه توسط یک قطعه، اغلب زمانی اتفاق می‌افتد که آن قطعه دچار خرابی/شکست شود؛ زمان پیش‌بینی شده تا آن لحظه، عبارت از عمر مفید باقیمانده می‌باشد [۱]. برای پیش‌بینی عمر مفید یک زیرسیستم یا قطعه، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. از برآوردهای احتمالی/آماری گرفته تا مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی و غیره که همه آنها مبتنی بر مدل‌های ریاضی می‌باشند.

در حوزه‌های مهندسی، متناسب با سیستم مورد مطالعه و نوع تحلیل مورد نیاز برای آن سیستم، از مدل‌های ریاضیاتی متفاوت و مختلفی برای مدل‌سازی، تحلیل و آنالیز به کار گرفته می‌شوند؛ بر این اساس، برای داشتن همه ویژگی‌های ارائه شده از عمر واقعی اجزا یک سیستم که می‌تواند توسط معادلات توصیف شوند، عناصر ایده‌آل فرض می‌شوند. اگرچه باید توجه داشت که میزان واقعی بودن یک مدل ریاضی به فرضیات در نظر گرفته شده برای آن مدل بستگی دارد [۲]. مدل‌سازی عبارت از بیان ریاضیاتی از فیزیک و اطلاعات سیستم بوده و نمایش دقیقی از دینامیک سیستم برای پاسخ به سؤالات مربوط به آنالیز و شبیه‌سازی می‌باشد. دیدگاه داخلی از سیستم‌های دینامیکی، تلاش برای توصیف فعل و انفعالات و عملکرد داخلی سیستم داشته و از مکانیک کلاسیک نشأت می‌گیرد. این فرآیند شامل آنالیز دقیق اثرات متقابل و روابط بین اجزای یک سیستم می‌باشد [۳]. مدل‌های براساس دیدگاه داخلی را مدل‌های حالت نیز می‌نامند. برای مدل‌سازی پیامدهای ناشی از تأثیرات داخلی در یک سیستم، لازم است تا علاوه بر مدل‌سازی رفتار جداگانه اجزاء، اثر متقابل آنها با اجزاء دیگر نیز مدل‌سازی گردد. مدل‌سازی بر مبنای تحلیل مارکوف در بسیاری از کاربردها مورد استفاده قرار گرفته و یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه تحلیل قابلیت اطمینان یک سیستم می‌باشد. بسیاری از این اصلاحات و تغییرات در جهت ساخت مدل‌های کارآمد و کاهش مستندسازی‌ها و فعالیت‌های ارزیابی می‌باشند. برخی از سیستم‌ها دارای مشخصه‌ها و اجزاء یکسانی می‌باشند [۴].

به طور کلی روش‌های تحلیلی مختلفی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قابل تعمیر و غیرقابل تعمیر و به طور خاص پیش‌بینی وجود دارد [۵]. مارکوف روشی برای مدل‌سازی رفتار اتفاقی سیستم‌هایی است که به طور پیوسته یا ناپیوسته نسبت به

زمان و یا در فضای حالت در تغییر هستند. این تغییرات اتفاقی را فرایندهای اتفاقی<sup>۱</sup> می‌نامند [۶]. فرایندهای اتفاقی ابزاری قدرتمند برای بررسی قابلیت اطمینان و آمادگی<sup>۲</sup> تجهیزات و سیستم‌های قابل تعمیر هستند. فرایند اتفاقی را می‌توان خانواده‌ای از متغیرهای تصادفی وابسته به زمان یا تابعی تصادفی در زمان در نظر گرفت و لذا فرایند اتفاقی دارای بنیادی نظری بر اساس نظریه احتمال است [۷].

## مروری بر تحقیقات پیشین

تعاریف مختلفی که برای تشریح مفهوم قابلیت اطمینان یک سیستم مهندسی ارائه می‌گردد، همگی دارای این وجه مشترک هستند که تابع قابلیت اطمینان - که با  $R(t)$  نشان داده می‌شود را بیانگر احتمال عملکرد مطلوب یک سیستم در فاصله زمانی  $(0, T)$  می‌دانند [۵, ۶]؛ از دیدگاه بیرونی احتمال آن که قلم بتواند وظیفه الزامی خود را در بازه زمانی و تحت شرایط مشخص انجام دهد قابلیت اطمینان گویند. هر گاه وظیفه الزامی توامان به شرایط معین و در بازه زمانی مشخص بیان شوند می‌تواند وابسته به زمان باشد در این صورت بایستی پروفایل ماموریت مشخص گردیده و ارقام قابلیت اطمینان به آن نسبت داده شود [۷]. با توجه به این که وسایل پرنده، در دسته سیستم‌های ماموریتی قرار دارند، قابلیت اطمینان مورد نظر مطالعه، قابلیت اطمینان ماموریتی<sup>۳</sup> است که به صورت {احتمال بی نقص بودن سیستم در مدت زمان انجام ماموریت به نحوی که بتواند ماموریت خود را با موفقیت به پایان برساند} تعریف می‌شود [۷]؛ لذا بر این اساس، فقط آن دسته از خرابی‌های سیستم‌ای که موجب وقوع خرابی کلی آن و از دست رفتن ماموریت سیستم می‌شوند، مورد توجه قرار می‌گیرند. به عبارتی، خرابی‌های جزئی سیستم که تأثیری بر ماموریت ندارند، هرچند بر افت قابلیت اطمینان بنیادی<sup>۴</sup> سیستم اثر گذاشته و مسلماً باعث افزایش زمان تعمیرات زمینی و افت آمادگی عملیاتی ناوگان می‌شوند، اما از آنجایی که بر انجام ماموریت اثر نمی‌گذارند، از حوزه قابلیت اطمینان ماموریتی خارج هستند. آمادگی اصطلاحی گسترده‌است که نسبت خدمات تحویل شده را به خدمات مورد انتظار نشان می‌دهد. اما از دیدگاه مهندسی قابلیت اطمینان، احتمال آن که قلم وظیفه الزامی خود را تحت شرایط معین در لحظه بیان شده از زمان  $t$  انجام دهد را آمادگی گویند [۷]. در خصوص مقایسه و ارتباط ایمنی و قابلیت اطمینان آن، لازم است اشاره شود که قابلیت اطمینان، ویژگی اجزاء سیستم است و می‌تواند بر کارکرد کل سیستم اثر بگذارد؛ در حالی که بنابر نظریه سیستم‌ها،

3. Mission Reliability  
4. Basic Reliability

1. Stochastics Process  
2. Availability

در برنامه‌های ماموریتی و حیاتی ایمنی که خواستار عملیات بدون نقص هستند، به خود جلب کرده‌اند [۱۲].

برای بررسی ماموریت پهپادها در ماموریت‌های جنگی، از آنجایی که محیط میدان جنگ به طور فزاینده‌ای پیچیده می‌شود، یک پهپاد منفرد در انجام ماموریت‌هایی که نیاز به همکاری چندین پهپاد دارد، مشکل دارد. با این حال، فضای جستجو بسیار بزرگ است و اهداف جستجو به صورت پراکنده توزیع می‌شوند و برنامه‌ریزی ماموریت و مسیر به طور همزمان نیز یک مشکل چندجمله‌ای غیرقطعی است که برنامه‌ریزی ماموریت را بسیار دشوار می‌کند. اخیراً، الگوریتم‌های جستجوی فراابتکاری که به طور گسترده در برنامه‌ریزی ماموریت مشترک چند پهپاد استفاده می‌شوند، یافتن راه‌حل‌های اولیه قابل اعتماد بر اساس الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده و الگوریتم‌هایی بر مبنای مدل زنجیره مارکوف برای این منظور پیشنهاد شده‌است که مشکلات برنامه‌ریزی ماموریت چند هدفه و چند پرنده را حل کرده و بقای پهپاد را تا حد زیادی بهبود بخشیده‌است. در زمینه قابلیت اطمینان ماموریت یک وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین توانایی آن است که ماموریت‌های مورد نظر خود را در شرایط عملیاتی مشخص برای مدت زمان مشخص انجام دهد. به منظور دستیابی به قابلیت اطمینان بالای ماموریت، ساختار بهینه پهپاد باید در زمانی که برخی از پهپادها در حین ماموریت از کار می‌افتند، تعیین شود. در این راستا، قابلیت اطمینان ماموریت و بهینه‌سازی ساختار پهپاد براساس اندازه‌گیری اهمیت مورد بررسی قرار گرفته و در ابتدا، مدل قابلیت اطمینان ماموریت پهپاد بر اساس سیستم‌های چند ضلعی خطی متوالی  $k$ -out-of- $n$ : F پیشنهاد شده‌است. در مرحله دوم نیز، بر اساس معیارهای اهمیت، عملکرد پهپاد با توجه به قابلیت اطمینان متفاوت یک پهپاد در مکان‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته‌است. همچنین، با سه شاخص قابلیت اطمینان مشروط، میزان شکست شرطی، عمر مفید باقی‌مانده، بهینه‌سازی ساختار پهپاد در طول فرآیند مأموریت مورد تحلیل قرار گرفته‌است [۱۳].

در این مقاله، با توجه به افزایش پیچیدگی و تنوع پهپادهای امروزی، قابلیت اطمینان آنها به یک مسئله برجسته تبدیل شده‌است که نیازمند راه‌حل‌های به‌روز متناسب با مشخصات پهپاد است. هدف این کار پرداختن به این شکاف با تمرکز بر جنبه قابلیت اطمینان کل سامانه است. ارزیابی قابلیت اطمینان برای اجزای هواپیمای بدون سرنشین می‌تواند خدمات و استفاده عادی از هواپیمای بدون سرنشین را تضمین کند. یکی از روش‌های بسیار کاربردی در ارزیابی قابلیت اطمینان اجزای هواپیمای بدون سرنشین، استفاده از فرآیند زنجیره مارکوف می‌باشد. این روش ابتدا یک مدل مارکوف از اجزای هواپیمای

مدل‌های حادثه‌ای، ایمنی ویژگی کلیت یک سیستم و نتیجه عملکرد ساختار کنترلی آن است؛ از این منظر، ایمنی می‌تواند از مسیری غیر از قابلیت کارکرد اجزاء، بر قابلیت اطمینان سیستم اثر بگذارد چرا که نقص ایمنی سیستم می‌تواند سبب افزایش احتمال وقوع خرابی آن و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان سیستم گردد [۸].

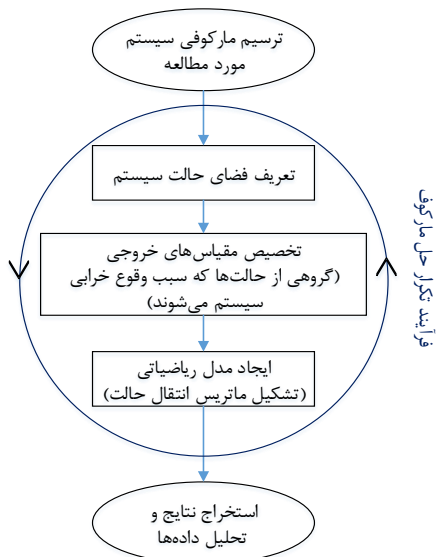
روش مارکوف دارای کاربردهای گسترده‌ای در انجام انواع مختلف تحلیل‌های ایمنی و قابلیت اطمینان می‌باشد [۹]. در تمام صنایع و در دنیای با کاربردهای واقعی، هنگامی که یک معماری خاص برای یک سیستمی انتخاب می‌شود، ارزیابی قابلیت اطمینان یک مسئله کلیدی در بهینه‌سازی طراحی هر سیستم پیچیده‌ای را نشان می‌دهد. هدف نهایی ارزیابی قابلیت اطمینان ذاتی در مرحله طراحی برای جلوگیری از هر گونه شکست بحرانی است که ممکن است منجر به اثر فاجعه بار بر روی پهپاد شود [۱۰]. در مورد استفاده واقعی از هواپیمای بدون سرنشین، آنالیزهای شبیه‌سازی طبق روش‌های مختلفی پیشنهاد شده و نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند قابلیت اطمینان مقادیر زیادی از اجزای مشابه را برای هواپیمای بدون سرنشین ارزیابی کند و دارای اهمیت زیادی برای اطمینان از سرویس و استفاده عادی از هواپیمای بدون سرنشین می‌باشد. در این راستا، برخی رویکردهای توسعه‌ای لجستیک جدید مبتنی بر قابلیت اطمینان و ارزیابی تعمیر و نگهداری، با هدف نهایی ایجاد فاصله کارآمدتر برای فعالیت‌های تعمیر و نگهداری وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین صورت گرفته‌است. یکی از این رویکردها، فلسفه معماری برای به دست آوردن یک ارزیابی قابلیت اطمینان دقیق‌تر است. همچنین، تلاش برای مطالعه قابلیت اطمینان ذاتی در مرحله اولیه طراحی مورد مطالعه قرار گرفته تا از مسائل بحرانی شدید در فازهای تولید و کاربری پهپاد جلوگیری شود. از سوی دیگر، فلسفه‌های مختلف تعمیر و نگهداری پهپادها در برخی از منابع نیز مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته و مفاهیم تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی توسعه داده شده‌اند تا سیستم را (تا زمانی که "شکست سخت" واقعی) در معرض تخریب جزئی عملکرد ("شکست نرم") قرار می‌دهد، در نظر بگیرند. همچنین، با ارزیابی عدم قطعیت از طریق فاصله اطمینان، محدودیت‌های جدید شکست نرم را با در نظر گرفتن دانش عمومی سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها به منظور تضمین فاصله نگهداری پیشگیرانه مناسب تعیین و توسعه داده شده‌اند [۱۱]. در زمینه قابلیت اطمینان سخت‌افزار پهپادها نیز مطالعاتی صورت گرفته و پلتفرم‌های محاسباتی که مسائل مربوط به قابلیت اطمینان سخت‌افزار وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین را توصیف می‌کند توسعه داده شده‌اند که اخیراً توجه قابل توجهی را

(علمی - پژوهشی)

جلال راعی، محمد نجفی و محمود فلاحت‌نیا

۱. احتمال رخ دادن انتقال از یک حالت سیستم به دیگری در بازه زمانی محدود  $\Delta t$  توسط  $\alpha \Delta t$  داده می‌شود و  $\alpha$  یک نرخ ثابت انتقال (نرخ ثابت خرابی و یا نرخ ثابت تعمیر) از یک حالت - سیستم به یک حالت - سیستم دیگری می‌باشد.
۲. احتمال رخداد بیش از یک جابجایی در بازه زمانی محدود  $\Delta t$  از یک حالت سیستم به حالت سیستم بعدی ناچیز و قابل اغماض می‌باشد.
۳. تمام رخدادها مستقل از یکدیگر هستند.

همچنین در حالتی که هدف ارزیابی قابلیت اطمینان عوامل انسانی - شناختی باشد استفاده از روش مارکوف کاربرد دارد [۴]. حوزه صحیح کاربرد این فن، زمانی است که نرخ‌های (وقوع خرابی و تعمیر) گذر به حالت سیستم بستگی داشته یا با بار، سطح تنش، ساختار سیستم (از قبیل حاضر در کنار)، خط‌مشی نگهداری یا عوامل دیگر تغییر کنند. به ویژه، ساختار سیستم (حاضر در کنار سرد یا گرم، یدکی‌ها) و خط‌مشی نگهداری (خدمه منفرد یا چندگانه)، وابستگی را ایجاد می‌کند که نمی‌تواند با سایر فنون با شدت محاسباتی کمتر در نظر گرفته شود؛ کاربردهای نوعی، پیش‌بینی‌های قابلیت اطمینان/آمادگی می‌باشند [۱۳]. به منظور آنالیز قابلیت اطمینان یک سیستم به کمک مدل‌سازی مارکوف، گام‌ها و عناصر کلیدی که مورد استفاده قرار می‌گیرند در شکل (۱) آورده شده‌است.



شکل (۱): مراحل کاربردی در مدل‌سازی مارکوف

مدل‌سازی بر مبنای زنجیره مارکوف دارای مزایایی از قبیل: فراهم آوردن مدل احتمالاتی انعطاف‌پذیر برای تحلیل

بدون سرنشین را ایجاد کرده، همراه با یک نمونه ثبت خطا برای به دست آوردن زمان ایستادن حالت و نرخ انتقال حالت، سپس از فناوری شتاب یکنواخت برای حل پارامترهای قابلیت اطمینان استفاده می‌کند. در این تحقیق، پهناد مستقر شده برای کاربردهای معین، حالت‌های خطا و خرابی خاص، و رویکردهای موجود برای ارزیابی قابلیت اطمینان و افزایش عملیات بدون خرابی پهناد را مورد مطالعه قرار می‌دهد. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه خطاها و خرابی‌ها در لایه‌های سیستم پهنادها رخ می‌دهد و چالش‌ها را تحلیل می‌کند.

### مدل‌سازی مارکوف

نام این روش برگرفته شده از یک ریاضیدان روسی به اسم "اندری آندروویچ مارکوف ۱۸۵۶-۱۹۹۲" می‌باشد؛ مدل‌سازی مارکوف، روشی آماری است که امکان استقلال آماری ویژگی‌های وقوع خرابی یا تعمیر اجزای منفرد با حالت سیستم وفق داده می‌شود. لذا روش مارکوف می‌تواند هم اثرات وقوع خرابی جزء وابسته به مرتبه و هم تغییر نرخ‌های گذر ناشی از تنش یا سایر عوامل را دربر بگیرد. به همین دلیل، تحلیل مارکوف روش مناسبی برای ارزیابی قابلیت اعتماد ساختارهای سیستم وظیفه‌ای پیچیده و استراتژی‌های پیچیده تعمیر و نگهداری است [۱۰]؛ این روش بر مبنای نظریه زنجیره‌های مارکوف قرار دارد؛ برای کاربردهای قابلیت اعتماد، مدل مرجع نرمال، مدل همگن زمانی مارکوف است که نیاز دارد نرخ‌های گذر (وقوع خرابی و تعمیر)، ثابت باشند. گذرهای غیرنمایی را می‌توان با هزینه افزایش فضای حالت، با یک توالی گذرهای نمایی تقریب زد. برای این مدل، فنون کلی و کارای حل عددی آماده‌است و تنها محدودیت برای کاربرد آن، بعد فضای حالت است [۱۱].

نمایش رفتار سیستم با استفاده از مدل مارکوف به تعیین تمامی حالت‌های ممکن سیستم نیاز دارد که ترجیحا به صورت نموداری در نمودار گذر حالت نشان داده می‌شود. علاوه بر این، نرخ‌های گذر (ثابت) از یک حالت به دیگری (نرخ‌های تعمیر یا وقوع خرابی جزء، نرخ‌های رویداد و غیره ...) باید مشخص شوند. خروجی‌های نوعی مدل مارکوف، احتمال بودن در یک مجموعه معلومی از حالت‌ها (نوعا این احتمال، مقیاس عملکرد آمادگی است) می‌باشد [۴].

استفاده از این روش برای مدل‌سازی سیستم‌های با نشانگان (مدهای) خرابی و تعمیر وابسته بسیار مفید می‌باشد (یعنی در سیستم‌های قابل جبران) و براساس فرض‌های زیر می‌باشد [۱۲]:

$$A \cdot P(t) = P'(t)$$

$$\text{yields} \rightarrow \begin{bmatrix} -a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & -a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & -a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & -a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ \dots \\ P_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P'_1(t) \\ P'_2(t) \\ P'_3(t) \\ \dots \\ P'_n(t) \end{bmatrix}$$

که در رابطه فوق  $a_{jk}$ ،  $j \neq k$  عبارت از نرخ انتقال از حالت  $j$  به حالت  $k$  می باشد. امان های قطری  $a_{jj}$ ، در ماتریس  $A$  عبارت از مجموع نرخ حرکت از حالت  $j$  می باشد، یعنی،  $a_{jj} = \sum_{k=1, k \neq j}^n a_{jk}$ . بنابراین، مجموع هر ستون از ماتریس  $A$  برابر 0 است. در رابطه فوق  $P_i(t)$ ، احتمال سیستم در حالت  $i$  و زمان  $t$  می باشد. و پارامتر  $n$  بیانگر تعداد حالت های بیان شده در مدل مارکوف می باشد. برای حل معادله دیفرانسیل، بطور نمونه می توان از تابع تبدیل لاپلاس استفاده کرد. جواب معادله فوق، شامل احتمال سیستم در هر حالت می باشد.

عدم قابلیت اطمینان سیستم را می توان با جمع کردن احتمال خرابی هر حالت بدست آورد:  $\sum_{i=1}^n P_{Fi}(t)$ ، که  $P_{Fi}(t)$ ، احتمال سیستم در حالت خرابی  $F_i$  در زمان  $t$  می باشد.

مدل مارکوف دارای قدرت بیشتری به عنوان یک روش حل نسبت به روش های دیگر می باشد و قادر به حل سیستم هایی با رفتار دینامیکی و وابسته می باشد. با این وجود، مدل مارکوف دارای نقطه ضعف های قابل توجهی نیز می باشد و با افزایش اندازه سیستم، این معایب به صورت نمایی افزایش می یابند. این رشد سریع تعداد حالات، ممکن است منجر به مدل های خودسرانه شود [۱۶]. بنابراین، بسیاری از محققان تلاش های خود را بر روی روش های محدود تقریبی که در آنها تنها بخشی از فضای حالت زنجیره مارکوف تولید شده، معطوف کرده اند. علاوه بر این، مدل مارکوف توزیع نمایی برای زمان تا-خرابی فرض می کند.

### پیاده سازی مدل مارکوف بر روی سیستم پهپاد

در این بخش، سناریو شامل مدل سازی وقوع خرابی احتمالی در هریک از زیرسیستم های پهپاد [۱۷] می باشد که طبق (شکل ۲) با یکدیگر در ارتباط می باشند.

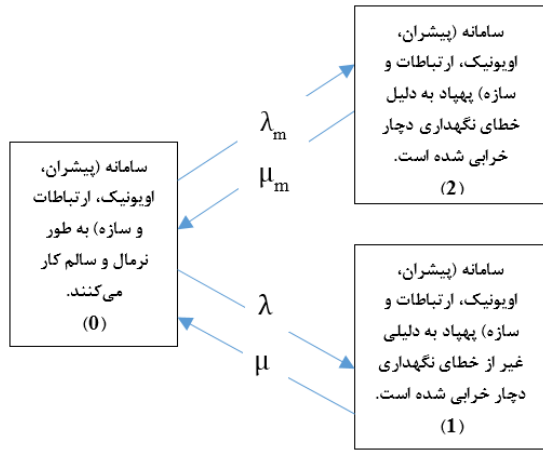
رفتار سیستم، قابلیت تطبیق برای پیکره بندی های پیچیده با افزونگی، خط مشی های نگهداری، قابلیت مدل سازی سیستم هایی با پیچیدگی کنترل خرابی-خطا با علت مشترک، راه حل های احتمالاتی را با ماژول هایی که باید به سایر مدل ها از قبیل نمودارهای بلوکی و درخت های خطا متصل شوند، فراهم می کند. در کنار این محاسن، مدل مارکوف دارای محدودیت هایی نیز می باشد که در حالت کلی عبارتند از: با افزایش تعداد اجزاء سیستم، منجر به رشد نمایی در تعداد حالت ها ایجاد می شود که خود منجر به تحلیل طاقت فرسای می شود، اعتبارسنجی و صحت گذاری نتایج مدل برای کاربران می تواند دشوار باشد و به نرم افزار خاصی جهت تحلیل نیاز دارد، این مدل فقط برای تحلیل سیستم هایی با نرخ خرابی ثابت کارآمد می باشد، و شاخص های خاص قابلیت اطمینان از قبیل MTTF و MTTR از حل عددی مدل مارکوف قابل دستیابی نمی باشند [۱۱].

### زنجیره مارکوف

رفتارهای دینامیکی سیستم را می توان با استفاده از زنجیره های مارکوف که برای حل آنالیزهای عدم قابلیت اطمینان سیستم مورد استفاده قرار می گیرد، مورد تحلیل قرار داد [۱۴]. دو مفهوم اساسی در زنجیره مارکوف، حالت های سیستم و انتقال های حالت می باشند. حالت یک سیستم نشان دهنده یک ترکیب خاص از پارامترهای سیستم است که سیستم را در هر لحظه معین از زمان توصیف می کند. برای نشان دادن قابلیت اطمینان سیستم، هر حالتی از زنجیره مارکوف بطور کلی بیانگر یک ترکیب متمایز از قطعات بی عیب و خطا می باشد. انتقال های حالت بر تغییرات حالتی نظارت می کنند که در درون یک سیستم رخ می دهد. با گذشت زمان و وقوع شکست، سیستم از حالتی به حالت دیگر می رود تا به یک حالت نهایی (معمولاً حالت شکست سیستم) برسد. انتقال های حالت براساس پارامترهایی نظیر نرخ های خرابی، عوامل پوشش خطا، و نرخ های تعمیرات مشخص می گردند. حل یک مدل از زنجیره مارکوف شامل حل یک مجموعه معادلات دیفرانسیلی می باشد. یک فرم خاص عبارت است از [۱۵]:

(علمی - پژوهشی)

جلال راعی، محمد نجفی و محمود فلاحت‌نیا



شکل (۳): نمودار فضا- حالت مارکوف با لحاظ نرخ تعمیرات

$$T = \begin{bmatrix} 1 - \lambda - \lambda_m & \lambda & \lambda_m \\ \mu & 1 - \mu & 0 \\ \mu_m & 0 & 1 - \mu_m \end{bmatrix} \quad (۳)$$

در نتیجه معادلات دیفرانسیل به دست آمده عبارتند از:

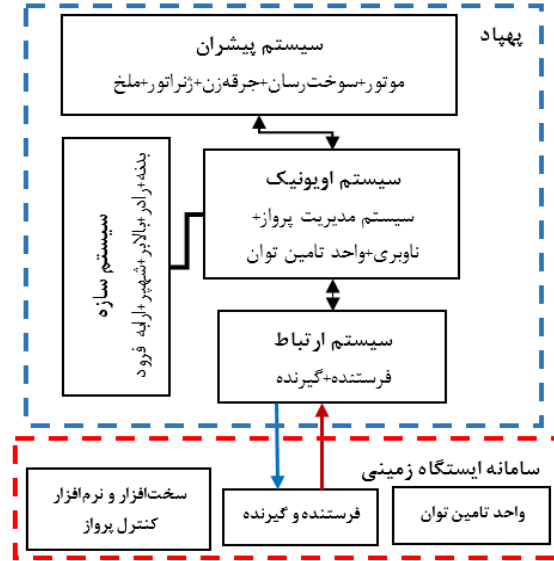
$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda + \lambda_m)P_0(t) = \mu_m P_2(t) + \mu P_1(t) \quad (۴)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + \mu P_1(t) = \lambda P_0(t) \quad (۵)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} + \mu_m P_2(t) = \lambda_m P_0(t) \quad (۶)$$

که در لحظه  $t=0$  خواهیم داشت  $P_0(0) = 1$  و  $P_1(0) = P_2(0) = 0$  همچنین پارامترهای به کار رفته در معادلات (۴) تا (۶) به شرح زیر تعریف می‌گردد:

$t$  معرف زمان می‌باشد؛  $P_j(t)$  بیانگر احتمالی است که پهپاد در زمان  $t$  ام در وضعیت  $j$  باشد، یعنی در  $j=0$  زیرسیستم پهپاد بدون خرابی است و به طور نرمال در حال کار می‌باشد و در  $j=1$  زیرسیستم پهپاد به علتی غیر از خطای نگهداری دچار وقوع خرابی می‌باشد و در  $j=2$  زیرسیستم پهپاد به دلیل خطای نگهداری دچار وقوع خرابی شده‌است؛ پارامتر  $\lambda$  نشانگر نرخ ثابت وقوع خرابی زیرسیستم، ناشی از عللی غیر از خطای نگهداری می‌باشد؛  $\lambda_m$  نرخ ثابت وقوع خرابی ناشی از خطای نگهداری می‌باشد؛  $\mu$  نرخ ثابت تعمیرات برای حالت  $j=1$  و  $\mu_m$  نرخ ثابت تعمیرات برای حالت  $j=2$  می‌باشد؛



شکل (۲): نمودار پیکربندی هوابمایی بدون سرنشین

براساس شکل ۲، سیستم پیشران شامل: موتور، سیستم سوخت‌رسانی، جرّقه‌زن، ژنراتور و ملخ، سیستم اویونیک شامل: سیستم مدیریت پرواز، سیستم ناوبری و واحد تامین توان؛ سیستم سازه شامل: بدنه، سطوح کنترل فرامین و ابره فرود؛ و سیستم ارتباط شامل: لینک داده‌ها بین هوابمای ایستگاه کنترل زمینی (فرستنده و گیرنده) می‌باشد می‌باشند [۱۸]. براساس سیستم‌های عنوان شده در شکل (۲)، سه فضای- حالت کلی می‌توان برای پهپاد تعریف کرد که در شکل ۳ نمایش داده شده و با اعداد ۰ و ۱ و ۲ نشانه‌گذاری شده‌است. بر اساس نمودار فضای حالت نشان داده شده داریم:

(۰): زیرسیستم پهپاد بدون خرابی (سالم) کار می‌کند.

(۱): زیرسیستم پهپاد به دلیلی غیر از خطای نگهداری دچار وقوع خرابی شده‌است ( $\lambda$ ).

(۲): زیرسیستم پهپاد به دلیل خطای نگهداری دچار وقوع خرابی شده‌است ( $\lambda_m$ ).

در ادامه با استفاده از روش مارکوف و معادلات و روابط ریاضیاتی مربوطه [۱۹] و پس از تشکیل ماتریس حالت گذار، معادلات دیفرانسیل برای شکل ۳ استخراج خواهد گردید.

$$P_j(t) = P \times T = [P_0(t) \ P_1(t) \ P_2(t)] \times T \quad (۲)$$

که در رابطه فوق،  $P_j(t)$ : بردار احتمال قابلیت اطمینان می‌باشد؛ و  $T$  ماتریس گذار می‌باشد که عبارت است از:

با استفاده از روش لاپلاس‌گیری، به حل معادلات دیفرانسیل (۴) تا (۶) پرداخته شده‌است که پس از اعمال تبدیلات لاپلاس خواهیم داشت:

$$c_1 + c_2 = -(\mu + \mu_m + \lambda + \lambda_m) \quad (۱۶)$$

و در نتیجه خواهیم داشت:

$$P_1(t) = \frac{\lambda \mu_m}{c_1 c_2} + \left\{ \frac{(\lambda c_1 + \lambda \mu_m)}{c_1 (c_1 - c_2)} \right\} e^{c_1 t} - \left\{ \frac{(c_2 + \mu) \lambda}{c_2 (c_1 - c_2)} \right\} e^{c_2 t} \quad (۱۷)$$

$$P_2(t) = \frac{\mu \lambda_m}{c_1 c_2} + \left\{ \frac{(\lambda_m c_1 + \mu \lambda_m)}{c_1 (c_1 - c_2)} \right\} e^{c_1 t} - \left\{ \frac{(c_2 + \mu) \lambda_m}{c_2 (c_1 - c_2)} \right\} e^{c_2 t} \quad (۱۸)$$

بنابراین، احتمال آن که هر یک از زیرسیستم‌های پهپاد در زمان و لحظه  $t$ ام به دلیل خطای نگهداری دچار وقوع خرابی گردد از رابطه (۱۸) قابل محاسبه می‌باشد. همچنین در صورتی که  $t$  به دست آمده در روابط (۱۷) و (۱۸) بسیار بزرگ شد یعنی با افزایش زمان، محاسبه احتمال حالت پایدار (مستقل از زمان) قرارگیری زیرسیستم پهپاد در هر یک از فضاهای -حالت ۰، ۱ و ۲ طبق روابط زیر انجام می‌پذیرد:

$$P_1 = \frac{\lambda \mu_m}{c_1 c_2} = \frac{\lambda \mu_m}{\mu \mu_m + \lambda \mu_m + \mu \lambda_m} \quad (۱۹)$$

$$P_2 = \frac{\lambda_m \mu}{c_1 c_2} = \frac{\lambda_m \mu}{\mu \mu_m + \lambda \mu_m + \mu \lambda_m} \quad (۲۰)$$

$$AV = \frac{\mu \mu_m}{\mu \mu_m + \lambda \mu_m + \mu \lambda_m} = P_0 = \frac{\mu \mu_m}{c_1 c_2} \quad (۲۱)$$

در ادامه می‌توان به منظور دستیابی به دو شاخص دیگر یعنی میانگین زمان برای وقوع خرابی در زیرسیستم پهپاد (MTTF) و قابلیت اطمینان زیرسیستم پهپاد در زمان و لحظه  $t$  ام  $R(t)$  با اعمال تغییراتی در شکل نمودار فضای شکل (۳) و با استفاده از روابط (۳) تا (۱۸)، محاسبات مجدد صورت پذیرد؛ توجه به این نکته حایز اهمیت است که شرط لازم برای دستیابی به روابط مربوط به پارامترهای MTTF و  $R(t)$ ، برقراری تساوی زیر می‌باشد:

$$\mu = \mu_m = 0 \quad (۲۲)$$

علت اعمال این شرط در سناریو آن است که در محاسبه دو شاخص MTTF و  $R(t)$  زیرسیستم پهپاد، نیازی به در نظر گرفتن نرخ تعمیرات نداریم و به عبارت دیگر: آنچه در این وضعیت اهمیت دارد زمان رسیدن به اولین وقوع خرابی می‌باشد. در نتیجه، نمودار فضای حالت شکل ۳ به نمودار ارائه شده در شکل ۴ تبدیل می‌شود.

$$P_0(s) = \frac{(s+\mu)(s+\mu_m)}{A} \quad (۷)$$

در رابطه فوق،  $s$  متغیر تبدیل لاپلاس و  $A$  مخرج مشترک حل دستگاه معادلات فوق می‌باشد که برابر است با:

$$A = s[s^2 + s(\mu + \mu_m + \lambda + \lambda_m) + (\mu \mu_m + \lambda \mu_m + \mu \lambda_m)] \quad (۸)$$

و در ادامه خواهیم داشت:

$$P_1(s) = \frac{\lambda(s+\mu_m)}{A} \quad (۹)$$

$$P_2(s) = \frac{\lambda_m(s+\mu)}{A} \quad (۱۰)$$

حالا با انجام لاپلاس‌گیری معکوس از معادلات (۷) تا (۱۰) داریم:

$$P_0(t) = \frac{\mu \mu_m}{c_1 c_2} + \left\{ \frac{(c_1 + \mu_m)(c_2 + \mu)}{c_1 (c_1 - c_2)} \right\} e^{c_1 t} - \left\{ \frac{(c_2 + \mu)(c_2 + \mu_m)}{c_1 (c_1 - c_2)} \right\} e^{c_2 t} \quad (۱۱)$$

رابطه (۱۱) بیانگر میزان آمادگی پهپاد براساس متغیر زمان  $t$  می‌باشد و یا به عبارت دقیق‌تر، قابلیت آمادگی سیستم براساس رابطه زیر می‌باشد:

$$AV = P_0(t) = \text{زیر سیستم پهپاد} \quad (۱۲)$$

همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، در لحظه  $t=0$  داریم  $P_0(0) = 1$  و  $P_1(0) = P_2(0) = 0$ ؛ بنابراین، برای یافتن ریشه‌های معادله درجه دوم (یعنی  $c_1$  و  $c_2$ ) استخراج گردیده در معادله (۸)، مقادیر پارامتری زیر بدست می‌آید:

$$c_1 \text{ and } c_2 = \frac{-b \pm [b^2 - 4(\mu \mu_m + \lambda \mu_m + \mu \lambda_m)]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (۱۳)$$

$$b = \mu + \mu_m + \lambda + \lambda_m \quad (۱۴)$$

$$c_1 \times c_2 = \mu \mu_m + \lambda \mu_m + \mu \lambda_m \quad (۱۵)$$

(علمی - پژوهشی)

جلال راعی، محمد نجفی و محمود فلاحت‌نیا

استفاده نمود، بنابراین، می‌توان برای محاسبه قابلیت اطمینان در زمان و لحظه  $t$  ام، از رابطه (۳۰) استفاده نمود:

$$R(t) = P_0(t) = e^{-(\lambda+\lambda_m)t} \quad (30)$$

زیر سیستم پهپاد  $R$

همچنین برای محاسبه زمان میانگین وقوع اولین خرابی طبق خواهیم داشت [۲۰]:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (31)$$

$$MTTF = E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (32)$$

که در رابطه (۳۲) عبارت‌های  $E(t)$  بیانگر مقدار قابل پیش‌بینی و  $f(t)$  بیانگر تابع چگالی احتمال خرابی در زیرسیستم پهپاد می‌باشند. بنابراین، با اعمال روابط (۳۱) و (۳۲) در رابطه (۳۰)، میانگین زمان لازم برای وقوع اولین خرابی در زیرسیستم پهپاد عبارت است از:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-(\lambda+\lambda_m)t} dt = \frac{1}{\lambda+\lambda_m} \quad (33)$$

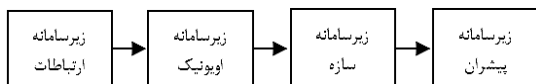
زیر سیستم پهپاد  $R$

در ادامه لازم است به منظور پیش‌بینی شاخص‌های قابلیت اطمینان، ابتدا با استفاده از بلوک دیاگرام کلی پهپاد، نوع پیکربندی هواپیمای بدون سرنشین تعیین گردد و سپس به تعریف روابط مورد نظر در ارزیابی قابلیت اطمینان پرداخته شود؛ برای این منظور و طبق بررسی‌های بعمل آمده از منبع پروازی پهپاد [۲۱-۱۹]، فرضیات زیر قابل بیان می‌باشند:

۱- تمامی المان‌های موجود در زیرسیستم‌های پهپاد بدون افزونگی فرض می‌گردد.

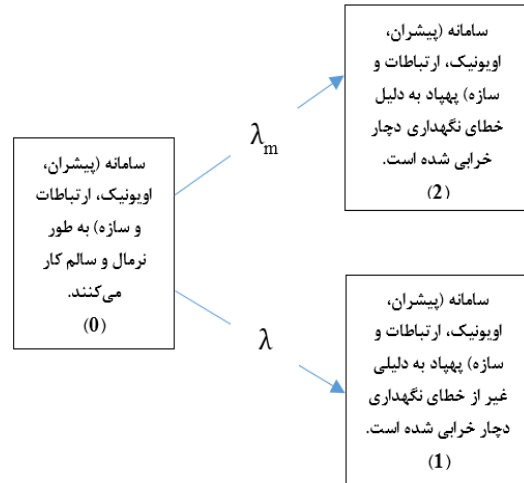
۲- وقوع خرابی در تمامی تجهیزات هر زیرسیستم پهپاد به صورت مستقل از یکدیگر فرض می‌گردد و به عبارت دیگر از وقوع خرابی‌های مد مشترک صرف نظر شده‌است.

بنابراین با توجه به فرضیات فوق، در این مقاله پیکربندی زیرسامانه‌های تشکیل‌دهنده پهپاد طبق شماتیک شکل ۳ به صورت شبکه سری در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۳): شماتیک پیکربندی سیستم با ساختار شبکه سری

حال با استفاده از روش مارکوف و پس از تشکیل ماتریس حالت گذار، معادلات دیفرانسیل برای نمودار شکل ۴ به صورت زیر می‌باشد؛ در این صورت، ماتریس انتقال حالت  $T$  و معادلات مشتقات فضای حالت  $(P_j(t))$  برای سیستم بدون در نظر گرفتن نرخ تعمیرات عبارت است از:



شکل (۴): نمودار فضا- حالت مارکوف بدون در نظر گرفتن نرخ تعمیرات

$$T = \begin{bmatrix} 1 - \lambda - \lambda_m & \lambda & \lambda_m \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

و با توجه به اینکه در لحظه  $t = 0$ ،  $P_0(0) = 1$  و  $P_2(0) = 0$ ، خواهیم داشت:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda + \lambda_m)P_0(t) = 0 \quad (24)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} - \lambda P_0(t) = 0 \quad (25)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} - \lambda_m P_0(t) = 0 \quad (26)$$

پس از اعمال جدول تبدیلات لاپلاس نتایج زیر حاصل می‌شود:

$$P_0(t) = e^{-(\lambda+\lambda_m)t} \quad (27)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\lambda_m} [1 - e^{-(\lambda+\lambda_m)t}] \quad (28)$$

$$P_2(t) = \frac{\lambda_m}{\lambda+\lambda_m} [1 - e^{-(\lambda+\lambda_m)t}] \quad (29)$$

از سه رابطه فوق می‌توان جهت محاسبه احتمال قرار گرفتن پهپاد در یکی از سه وضعیت ۰، ۱، ۲ تا زمان وقوع اولین خرابی

در نهایت، به منظور دستیابی به فرمول ارزیابی آمادگی پهپاد طبق مدل ارائه شده در شکل ۳، و با لحاظ نمودن شرایط حاکم بر پیکربندی سری پهپاد در رابطه (۲۱) و جایگذاری  $n=4$  (تعداد زیرسامانه‌ها) خواهیم داشت:

$$AV = \prod_{i=1}^n \{P_0\}_i = \prod_{i=1}^n \frac{\mu_i \mu_{mi}}{\mu_i \mu_{mi} + \lambda_i \mu_{mi} + \mu_i \lambda_{mi}} \Rightarrow AV = \prod_{i=1}^4 \{P_0\}_i = \prod_{i=1}^4 \frac{\mu_i \mu_{mi}}{\mu_i \mu_{mi} + \lambda_i \mu_{mi} + \mu_i \lambda_{mi}} \quad (38)$$

رابطه فوق بیانگر میزان آمادگی پهپاد برای انجام ماموریت‌های عملیاتی می‌باشد. بدین ترتیب، روابط مورد نیاز برای پیش‌بینی شاخص‌های قابلیت اطمینان برای پهپاد و براساس تعداد زیرسیستم‌ها و بر مبنای تحلیل به کمک مدل مارکوف استخراج گردید و در جدول ۱ آورده شده‌است.

جدول (۱): روابط شاخص‌های قابلیت اطمینان پهپاد براساس تحلیل مدل مارکوف

معادله مستخرج	شاخص قابلیت اطمینان
$AV = \prod_{i=1}^4 \{P_0\}_i = \prod_{i=1}^4 \frac{\mu_i \mu_{mi}}{\mu_i \mu_{mi} + \lambda_i \mu_{mi} + \mu_i \lambda_{mi}}$	آمادگی (AV)
$R(t) = P_0(t) = e^{-(\lambda + \lambda_m)t}$	قابلیت اطمینان (R(t))
$MTTF = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})}$	میانگین زمان تا خرابی (MTTF)
$\lambda(t) = \frac{-1}{e^{-\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})t}} \times \left[ -\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi}) \right] \times e^{-\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})t}$	نرخ خرابی (λ(t))

### تحلیل عددی

در یک بررسی میدانی مرتبط با یک پهپاد مدل (مجهز به زیر سامانه‌های: الف) پیشران؛ ب) اویونیک؛ ج) سازه؛ د) ارتباطات) داده‌های مربوط به نرخ‌های خرابی ثابت زیر سامانه و نرخ‌های

نمودار شکل ۳ بیانگر یک سامانه با  $n=4$  واحدی مفروض از هواپیمای بدون سرنشین می‌باشد که با اعداد  $i = 1, 2, 3, 4$  و به صورت شبکه سری، نمایش داده شده‌است و هر بلوک در داخل این نمودار نشان دهنده یک زیرسامانه می‌باشد. چنانچه هر کدام از این  $n=4$  زیرسامانه خراب شود کل سامانه/شبکه/پیکربندی خراب می‌شود؛ به عبارت دیگر: برای عملکرد موفق این پیکربندی سری پهپاد، لازم است تا تمامی  $n=4$  واحد به طور نرمال و سالم کار نماید. بنابراین، برای محاسبه رابطه قابلیت اطمینان برای کل سامانه با ساختاری سری، با استفاده از روابط (۳۴) و (۳۵) خواهیم داشت:

$$R_{series} = P(E_1 E_2 E_3 \dots E_n) = P(E_1) P(E_2) P(E_3) \dots P(E_n) \quad (34)$$

که در این رابطه:

$E_i$  عملکرد موفق (پیشامد موفق) برای زیرسیستم  $i$  ام می‌باشد که در آن  $i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$  می‌باشد و  $P(E_1 E_2 E_3 \dots E_n)$  احتمال اتفاق رویدادهای  $E_1$  تا  $E_n$  می‌باشد و  $R_s$  قابلیت اطمینان کل سیستم می‌باشد.

$$R_{series} = R_1 R_2 R_3 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \rightarrow R_{UAV} = R \times \text{ارتباطات} \times R_{سازه} \times R_{موتور} \times R_{اویونیک} = \prod_{i=1}^4 e^{-(\lambda_i + \lambda_{mi})t} = e^{-\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})t} \quad (35)$$

با جاگذاری معادله فوق در رابطه (۳۰)، عبارت زیر برای MTTF یا میانگین زمان تا وقوع خرابی برای کل سامانه بدست خواهد آمد:

$$MTTF_{UAV} = \int_0^{\infty} R_{UAV}(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})t} dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})} \quad (36)$$

همچنین، تابع نرخ خرابی ( $\lambda(t)$ ) برای کل سیستم نیز قابل محاسبه و برآورد می‌باشد که عبارت است از:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \times \frac{dR(t)}{dt} \rightarrow \lambda_{UAV}(t) = \lambda_{series} = \frac{-1}{e^{-\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})t}} \times \left[ -\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi}) \right] \times e^{-\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})t} \quad (37)$$

## (علمی - پژوهشی)

جلال راعی، محمد نجفی و محمود فلاحت‌نیا

و به همان روش:

$$P_1 = 0.01063 \text{ زیر سامانه اویونیک}$$

$$P_1 = 0.11111 \text{ زیر سامانه سازه}$$

$$P_1 = 0.06666 \text{ زیر سامانه پیشران}$$

از طرفی و با توجه به رابطه (۲۰)، احتمال آنکه زیر سامانه‌های ارتباطات، اویونیک، سازه و پیشران پهباد به دلایلی ناشی از خطای نگهداری دچار خرابی شده باشد به ترتیب عبارتست از:

$$P_2 = \frac{\lambda_m \mu}{\mu \mu_m + \lambda \mu_m + \mu \lambda_m};$$

$$P_2 = \frac{\text{زیر سامانه ارتباطات } \mu}{\text{زیر سامانه ارتباطات } \mu + \text{زیر سامانه ارتباطات } \lambda + \text{زیر سامانه ارتباطات } \mu \mu_m}$$

$$= \frac{0.09 \times 0.9}{0.9 \times 0.9 + 0.04 \times 0.9 + 0.9 \times 0.09} = 0.087378$$

و به همان روش:

$$P_2 = 0.03191 \text{ زیر سامانه اویونیک}$$

$$P_2 = 0.05555 \text{ زیر سامانه سازه}$$

$$P_2 = 0.07619 \text{ زیر سامانه پیشران}$$

همچنین با توجه به رابطه (۲۱)، احتمال آنکه زیر سامانه‌های ارتباطات، اویونیک، سازه و پیشران پهباد به طور نرمال و سالم کار کند به ترتیب عبارتست از:

$$P_0 = AV = \frac{\mu \mu_m}{\mu \mu_m + \lambda \mu_m + \mu \lambda_m};$$

$$P_0 = \frac{\text{زیر سامانه ارتباطات } \mu}{\text{زیر سامانه ارتباطات } \mu + \text{زیر سامانه ارتباطات } \lambda + \text{زیر سامانه ارتباطات } \mu \mu_m}$$

$$= \frac{0.9 \times 0.9}{0.9 \times 0.9 + 0.04 \times 0.9 + 0.9 \times 0.09} = 0.873786$$

و به همان روش:

$$P_0 = 0.95744 \text{ زیر سامانه اویونیک}$$

$$P_0 = 0.83333 \text{ زیر سامانه سازه}$$

تعمیرات ثابت زیر سامانه با تفکیک خرابی ناشی از خطای نگهداری ( $\mu_m$  و  $\lambda_m$ ) و همچنین خرابی غیر از خطای نگهداری ( $\mu$  و  $\lambda$ ) به شرح زیر جمع آوری گردید:

(۱) نرخ خرابی ثابت ناشی از خطای نگهداری ( $\lambda_m$ ) در زیر سامانه‌های ارتباطات، اویونیک، سازه و پیشران به ترتیب عبارتند از:

$$= 0.0009 \text{ زیر سامانه ارتباطات } \lambda_m \text{ خرابی در هر ساعت؛}$$

$$= 0.0003 \text{ زیر سامانه اویونیک } \lambda_m \text{ خرابی در هر ساعت؛}$$

$$= 0.0006 \text{ زیر سامانه سازه } \lambda_m \text{ خرابی در هر ساعت؛}$$

$$= 0.0008 \text{ زیر سامانه پیشران } \lambda_m \text{ خرابی در هر ساعت؛}$$

(۲) نرخ تعمیرات ثابت ناشی از خطای نگهداری ( $\mu_m$ ) در تمامی زیر سامانه‌های ارتباطات، اویونیک، سازه و پیشران یکسان و برابر با  $0.0009$  تعمیر در هر ساعت می‌باشد؛

(۳) نرخ خرابی ثابت ناشی از دیگر خرابی‌ها ( $\lambda$ ) در زیر سامانه‌های ارتباطات، اویونیک، سازه و پیشران به ترتیب عبارتند از:

$$= 0.0004 \text{ زیر سامانه ارتباطات } \lambda \text{ خرابی در هر ساعت؛}$$

$$= 0.0001 \text{ زیر سامانه اویونیک } \lambda \text{ خرابی در هر ساعت؛}$$

$$= 0.0012 \text{ زیر سامانه سازه } \lambda \text{ خرابی در هر ساعت؛}$$

$$= 0.0007 \text{ زیر سامانه پیشران } \lambda \text{ خرابی در هر ساعت؛}$$

(۴) نرخ تعمیرات ثابت ناشی از دیگر خرابی‌ها ( $\mu$ ) در تمامی زیر سامانه‌های ارتباطات، اویونیک، سازه و پیشران یکسان و برابر با  $0.0009$  تعمیر در هر ساعت می‌باشد؛

بنابراین با توجه به رابطه (۱۹)، احتمال آنکه زیر سامانه‌های ارتباطات، اویونیک، سازه و پیشران پهباد به دلایلی غیر از خطای نگهداری دچار خرابی شده باشد به ترتیب عبارتست از:

$$P_1 = \frac{\lambda \mu_m}{\mu \mu_m + \lambda \mu_m + \mu \lambda_m}$$

$$P_1 = \frac{\text{زیر سامانه ارتباطات } \lambda}{\text{زیر سامانه ارتباطات } \lambda + \text{زیر سامانه ارتباطات } \mu \mu_m + \text{زیر سامانه ارتباطات } \mu \lambda_m}$$

$$= \frac{0.04 \times 0.9}{0.9 \times 0.9 + 0.04 \times 0.9 + 0.9 \times 0.09} = 0.03883$$

۱- به منظور افزایش شاخص  $R(t)$  لازم است تا شرکت سازنده پهپاد به منظور کاستن از مجموع نرخ‌های خرابی  $(\lambda_i + \lambda_{mi})$  و از طریق کاهش زیرسیستم‌های پهپاد، نسبت به کاستن از پیچیدگی‌های پهپاد در طراحی‌های آتی خود اقدام نماید؛ این امر نه تنها سبب افزایش  $R$  نهایی می‌گردد بلکه از طریق کاهش پیچیدگی‌های فلی می‌تواند منجر به افزایش آمادگی و همچنین کاهش  $\lambda$  و در نهایت بهبود ایمنی گردد.

۲- از روابط بدست آمده می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که نه تنها شرکت سازنده می‌تواند از طریق بهبود کیفی در حین ساخت قطعات و زیرسامانه‌ها به ارتقاء قابلیت اطمینان و میزان آمادگی پهپاد کمک شایانی نماید، بلکه حتی خود بهره‌بردار نیز می‌تواند از طریق بهبود کیفی در شیوه‌های تعمیر و نگهداری و کاستن از خطاهای مرتبط با عملیات نگهداری به طور چشمگیری در کاهش دادن  $\lambda(t)$  و به دنبال آن افزایش دادن  $R(t)$  و  $AV(t)$  نقش موثری ایفا نماید.

۳- در صورت وجود داده‌های آماری مناسب امکان دسترسی به نرخ خرابی‌های ثابت سالیانه و تعمیرات ثابت سالیانه و با جایگذاری آن در ماتریس گذار ارائه شده در این مقاله، می‌توان نسبت به پیش‌بینی هر یک از شاخص‌های قابلیت اطمینان (جدول ۱) هم برای زیرسامانه‌های پهپاد و هم برای کل سامانه پهپادی مورد نظر، اقدام کرد.

۴- در این مقاله تمامی روابط و فرمول‌های به‌دست‌آمده برای پهپاد ( $n=4$ ) از قابلیت تعمیم‌دهی به سایر انواع پهپادها (به شرط پیروی از شبکه‌بندی سری) برخوردار می‌باشد.

۵- یک تحلیل عددی با محاسبه نرخ خرابی زیر سامانه‌ها، قابلیت اطمینان و میانگین زمان تا وقوع خرابی  $MTTF$  یک پهپاد ارائه شده است.

همچنین در مواردی که سامانه‌های پهپادی از ساختاری غیر از شبکه-بندی سری استفاده نموده‌اند نیز می‌توان بدون تغییردهی سناریو و مدل ارائه شده در این مقاله و تنها از طریق اعمال تغییرات در گام مرتبط با نوع پیکربندی استفاده شده در آن پهپاد خاص، مجدداً به اصلاح روابط ارائه شده برای شاخص‌های قابلیت اطمینان و بر مبنای نیاز بهره‌بردار، پرداخت.

## مراجع

- [1] S. B. Johnson et al., *System health management: with aerospace applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] B. Dhillon, A. Fashandi, and K. Liu, "Robot systems reliability and safety: A review," *Journal*

$$P_0 = 0.85714$$

زیر سامانه پیشران  $P_0$  و در نهایت با در نظر گرفتن بلوک دیاگرام کلی پهپاد و با توجه نوع پیکر بندی آن و نیز توجه به فرضیات مطروحه (مبنی بر عدم وجود افزونگی در زیر سامانه‌های پهپاد مورد مطالعه و وقوع خرابی‌ها در زیر سامانه‌های آن به صورت مستقل) جهت محاسبه قابلیت اطمینان پهپاد در ساعت  $t = 100$  و جایگذاری در روابط (۳۵) و (۳۶)، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} R_{UAV}(t = 100) &= R_{\text{سازه}} \times R_{\text{پیشران}} \times R_{\text{اویونیک}} \times R_{\text{ارتباطات}} \\ &= \prod_{i=1}^4 e^{-(\lambda_i + \lambda_{mi})t} = e^{-\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})t} \\ &= e^{-(0.0004 + 0.0009 + 0.0001 + 0.0003 + 0.0012 + 0.0006 + 0.0007 + 0.0008) \times 100} \\ &= e^{-0.5} \cong 0.606 \end{aligned}$$

لذا قابلیت اطمینان کلی پهپاد مورد مطالعه برابر با  $60.6\%$  بدست می‌آید.

و در ادامه میانگین زمان تا وقوع خرابی در پهپاد برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} MTTF_{UAV} &= \int_0^{\infty} e^{-\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})t} dt = \\ &= \frac{1}{\sum_{i=1}^4 (\lambda_i + \lambda_{mi})} = \frac{1}{0.005} = 200 \text{ ساعت} \end{aligned}$$

لذا میانگین زمن تا خرابی پهپاد مورد مطالعه برابر با  $200$  ساعت بدست می‌آید.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش گردید تا ابتدا با شناسایی و معرفی روش مارکوف به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان و ایمنی، به بیان مزایا و محدودیت‌های این روش پرداخته شود و سپس مدلی ریاضی از حالت فضای وقوع خرابی در پهپاد ارائه شود و پس از تعیین ماتریس گذار و انجام محاسبات مربوط به حل معادلات دیفرانسیل به دست آمده در حوزه فرکانس  $s$  (مبتنی بر لاپلاس‌گیری) و بازگرداندن این معادلات حل شده به حوزه زمان  $t$  (بر مبنای لاپلاس معکوس)، روابط مربوط به شاخص‌های قابلیت اطمینان در پهپاد استخراج گردد که خلاصه این روابط در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به اینکه در مطالعه سامانه موردی، نوع شبکه‌بندی پهپاد به صورت سری معلوم گردید لذا به منظور بهبود در شاخص‌های قابلیت اطمینان (همچون:  $R(t)$  و  $AV(t)$  و  $MTTF(t)$  و  $\lambda(t)$ ) موارد زیر نتیجه‌گیری می‌شود:

- reliability assessment using hierarchical Markov modeling," *IEEE Transactions on power Delivery*, vol. 11, no. 4, pp. 1929-1934, 1996.
- [13] B. S. Dhillon, *Human reliability and error in transportation systems*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [14] R. J. Patton, P. M. Frank, and R. N. Clark, *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [15] J. Kahle and F. Collani, *Advances in Stochastic Models for Reliability, Quality and Safety*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [16] M. Nadjafi, M. A. Farsi, and H. Jabbari Khamnei, "Dynamic fault tree analysis using fuzzy LU bounds failure distributions," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 3275-3286, 2017.
- [17] R. G. Rajagopalan and S. R. Mathur, "Three dimensional analysis of a rotor in forward flight," *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 38, no. 3, pp. 14-25, 1993.
- [18] R. Schaefer, "Unmanned aerial vehicle reliability study," *Office of the Secretary of Defense, Washington, DC*, 2003.
- [19] M. Lawrence, "Lemis: Probabilistic Models and Statistical Methods," ed: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1995.
- [20] S. Stanley, "Mtb, mttr, mttf & fit explanation of terms," *IMC Networks*, pp. 1-6, 2011.
- of quality in maintenance engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 170-212, 2002.
- [3] B. Vesely, "Fault tree analysis (FTA): Concepts and applications," *NASA HQ*, 2002.
- [4] B. S. Dhillon, *Reliability, quality, and safety for engineers*. CRC Press, 2004.
- [5] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems*. Springer, 1992.
- [6] C. Singh and R. Billinton, *System reliability, modelling and evaluation*. Hutchinson London, 1977.
- [7] M. Stamatelatos, W. Vesely, J. Dugan, J. Fragola, J. Minarick, and J. Railsback, "Fault tree handbook with aerospace applications," 2002.
- [8] J. G. Leishman and A. Bagai, "Challenges in understanding the vortex dynamics of helicopter rotor wakes," *AIAA journal*, vol. 36, no. 7, pp. 1130-1140, 1998.
- [9] L. Xing and S. V. Amari, "Fault tree analysis," in *Handbook of performability engineering*: Springer, 2008, pp. 595-620.
- [10] P. Pukite and J. Pukite, *Markov modeling for reliability analysis*. Wiley-IEEE Press, 1998.
- [11] G. Barakos, T. Fitzgibbon, A. Kusyumov, S. Kusyumov, and S. Mikhailov, "CFD simulation of helicopter rotor flow based on unsteady actuator disk model," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 33, no. 9, pp. 2313-2328, 2020.
- [12] R. E. Brown, S. Gupta, R. D. Christie, S. S. Venkata, and R. Fletcher, "Distribution system