

طراحی و تحلیل یک موتور توربوفن دومحوره سبک براساس مهندسی قابلیت اطمینان

مجتبی محمدپور^۱ و جاماسب پیرکندی^۲ محمد پورگل محمد^۳ مهدی جهرمی^۴
 مجتمع دانشگاهی هوافضا مجتمع دانشگاهی هوافضا مجتمع دانشگاهی هوافضا
 دانشگاه صنعتی مالک اشتر دانشگاه صنعتی سهند دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 (تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۵/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۵)

چکیده

در این مقاله، یک موتور توربوفن در مرحله طراحی اولیه در نظر گرفته شده و شرایط محیطی و عملکردی آن از نقطه نظر قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به فرض عدم دسترسی به داده‌های خرابی اختصاصی موتور، جهت گردآوری آنها از بانک‌های داده‌ی عمومی و تخمین‌های کارشناسانه استفاده شده است. بعد از تقسیم‌بندی سیستم موتور به زیرسیستم‌ها، مدل‌سازی قابلیت اطمینان به کمک دیاگرام‌های بلوکی و اعمال روش مونت کارلو انجام شده است. نتایج به دست آمده، شامل ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم و زیرسیستم‌ها و اهمیت قابلیت اطمینان می‌باشد. قابلیت اطمینان موتور در ۱۵۰ ساعت پروازی به زیر ۹۷ درصد می‌رسد. در ادامه، جهت ارتقای سطح قابلیت اطمینان موتور، از تخصیص قابلیت اطمینان ۹۷ درصد برای ۳۰۰ ساعت پرواز استفاده شده و پیشنهادات برای بهبود قابلیت اطمینان موتور، انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که فیلترها، پمپ‌ها، پره‌ها و دیسک‌های مورد استفاده در قسمت‌های چرخان از حساس‌ترین بخش‌های موتور می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: موتور توربوفن، قابلیت اطمینان، تخصیص قابلیت اطمینان، شبیه‌سازی مونت کارلو

Reliability Based Design and Analysis of a Twin-Shaft Turbofan Engine

M. Mohammadpour and J. Pirkandi

Aerospace Engineering Department
 Malek Ashtar University of Technology

M. PourgolMohammad

Mechanical Engineering Department
 Sahand University of Technology

M. Jahromi

Aerospace Engineering Department
 Malek Ashtar University of
 Technology

(Received: 11/August/2014 ; Accepted: 4/February/2014)

ABSTRACT

In this paper a double-shaft turbofan engine is considered to be in the design phase. Therefore its environmental condition and critical source of failures has been studied and the subsystems and components has been identified. Since it is in design phase, the project encounters to the lack of specified failure data. To overcome this problem, the generic data or expert judgments on the basis of environmental condition is used. Then Simulation process utilizing Reliability Block Diagrams and implementation of Monte Carlo Method has been done. The results involve reliability evaluation of system and Reliability Importance. The engine has less than 97 percent reliability in 150 flight hours. Finally a Reliability Allocation method has been utilized to improve the reliability measure to 97 percent in 300 flight hours. Results reveal that oil and fuel filters and pumps and the disks and blades of rotating subsystems are the most sensitive and critical parts of engine.

Keywords: Turbofan Engine, Reliability, Reliability Allocation, Monte Carlo Method

^۱ - کارشناسی ارشد: moj.mohammadpour68@gmail.com

^۲ - استادیار (نویسنده پاسخگو): jpirkandi@mut.ac.ir

^۳ - استادیار: pourgolmohammad@sut.ac.ir

^۴ - استادیار: jahromi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

در عصر حاضر، بحث‌های قابلیت اطمینان با افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولاتی با قابلیت اطمینان بالا، بیش از پیش برای تولیدکنندگان، مهم و اساسی شده است. یک طراحی زمانی کامل و بی‌نقص خواهد بود که سیستم موردنظر در طول عمری که از قبل برایش تعیین شده، موثر و فعال باشد و بدون خرابی به هدف تعیین شده سیستم برسد. برای کاهش خرابی در سیستم‌های مهندسی باید طراحان از چگونگی وقوع خرابی آگاهی یافته و برای جلوگیری از وقوع آن، پیش‌بینی اولیه‌ای داشته باشند. همه عوامل بالقوه منجر به خرابی، در یک طراحی به‌طور کامل قابل شناسایی و درک نبوده و بر این اساس، پیش‌بینی خرابی و تحلیل قابلیت اطمینان یک فرآیند احتمالاتی خواهد بود [۱]. خرابی‌ها نتیجه قرارگرفتن یک سیستم در چالش بوده و زمانی که چالش‌ها از مقدار ظرفیت سیستم تجاوز کند، خرابی ممکن است رخ دهد. هر سیستمی در معرض تنش‌های مکرر و خارج از حد ظرفیتش قرار گیرد، امکان کاهش بازدهی و کارایی آن وجود دارد که در این حالت گفته می‌شود آن وسیله دچار خرابی شده است. موتور توربوفن نیز مشابه هر سیستم مکانیکی دیگر، در معرض تنش‌های متعدد قرار دارد. با توجه به این مسئله، شناخت دقیق حالت‌های بحرانی سیستم و پتانسیل‌های شکست، برای بهبود طراحی و جلوگیری از آن امری ضروری به‌نظر می‌رسد [۲].

اهمیت بحث‌های قابلیت اطمینان و رشد سریع آن در چند دهه‌ی اخیر، نظر بسیاری از محققان را به‌خود جلب کرده است. آوانتور و همکاران^۱ [۳]، یک روش تحلیل قابلیت اطمینان را به عنوان ابزاری در فاز طراحی مفهومی ارائه دادند. با توجه به اینکه حدود ۸۰ درصد هزینه‌های طراحی در ۲۰ درصد زمان اولیه یعنی فاز طراحی مفهومی مشخص می‌گردد، تحلیل قابلیت اطمینان در این فاز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. نتایج این پژوهش بیانگر افزایش قابلیت اطمینان سیستم در اثر اعمال تحلیل قابلیت اطمینان در فاز طراحی می‌باشد. هالوران و همکاران^۲ [۴]، روش پیش‌بینی قابلیت اطمینان جهت طراحی اولیه را مورد بررسی قرار داده‌اند. خروجی این روش مجموعه‌ای از طراحی‌هایی می‌باشد که دارای مقادیر قابلیت اطمینان از پیش تعیین‌شده و حتی بیشتر از آن می‌باشد. بعد از جمع‌آوری داده‌ها و بررسی توزیع‌ها و حذف برخی

از قطعات، گزینه‌های مختلف طراحی برای مشخص کردن اینکه کدام یک از آنها به قابلیت اطمینان هدف نزدیک‌تر است، بررسی می‌شود. پیتوری و همکاران^۳ [۵]، به تخمین قابلیت اطمینان یک سیستم با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بعد از بررسی فیزیک خرابی حاکم بر آن پرداخته و توزیع مناسب حاکم بر رفتار خرابی را شناسایی نمودند. متاس^۴ [۶] مدلی پیشنهاد کرده که براساس آن، حداقل قابلیت اطمینان موردنیاز برای اجزای متعدد یک سیستم، با استفاده از تخصیص قابلیت اطمینان بر پایه تابع هزینه تخمین زده می‌شود. قابلیت اطمینان تخمین زده‌شده، مقدار قابلیت اطمینان هدف را برای سیستم نشان می‌دهد. وکمن و همکاران^۵ [۷] در پژوهشی با استفاده از فرآیندهای وایبل و پواسون ناهمگن به مدل‌سازی عمر یک موتور جت پرداختند. مقدس و فدایی [۸] برای ارزیابی قابلیت اطمینان با بهره‌گیری توامان از روش مونت‌کارلو و شبکه‌های عصبی مصنوعی، به بررسی قابلیت اطمینان سازه‌ای پرداختند.

با توجه به رقابت در بازار برای تولید محصولات با قابلیت اطمینان بالا، روش‌های طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان نقش بسیار مهمی در تامین اهداف طراحی از نقطه‌نظر رسیدن به سطح کیفیت مورد انتظار یک محصول در فازهای مختلف طول عمر آن ایفا می‌کنند. روش طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان، روشی نوین در دنیا و با شناختی محدود در کشور ایران است. در پژوهش حاضر، با استفاده از پایه و اساس کارهای گذشته، به توسعه‌ی روشی جهت تحلیل قابلیت اطمینان سیستم موتور توربوفن در مرحله طراحی اولیه پرداخته شده است. نوآوری این پژوهش، ارایه‌ی الگویی جهت محاسبات قابلیت اطمینان یک سیستم مانند موتور توربوفن در مرحله طراحی و رساندن آن به سطح مورد انتظار قابلیت اطمینان بدون در اختیارداشتن داده‌های اختصاصی خرابی می‌باشد. اجزای تشکیل‌دهنده سیستم و همچنین، نحوه ارتباط آنها با یکدیگر، از نقطه‌نظر قابلیت اطمینان، شناسایی شده و در گام بعدی به جمع‌آوری و تعیین داده‌های خرابی قطعات موجود در سیستم با استفاده از داده‌های اختصاصی محدود و داده‌های عمومی به‌دست‌آمده از بانک داده‌های خرابی، همچون اوردا^۶ [۹] پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده شامل محاسبه قابلیت اطمینان، اهمیت

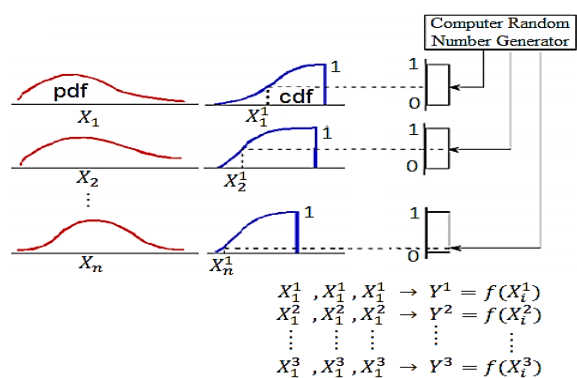
3 - Patowary
4 - Mettas
5 - Weckman
6 - OREDA

1 - Avontuur
2 - O'Halloran

شبیه‌سازی مسائل آماری مورد استفاده قرار گیرد. امروزه استفاده از این روش در علوم مختلفی مثل فیزیک، اقتصاد و قابلیت اطمینان رایج است. دو دسته ورودی برای شبیه‌سازی مونت‌کارلو لازم است. دسته نخست ورودی‌ها، شامل توزیع خرابی یا تعمیرات، توزیع‌های آماری استحکام مواد و مجموعه پارامترهای هر توزیع است. دسته دوم شامل منطق سیستم بوده و به عبارت دیگر، نحوه ارتباط اجزا و قطعات با یکدیگر و تاثیر خرابی آنها بر همدیگر و بر خرابی کل سیستم می‌باشد [۱۲].

در این شبیه‌سازی، مقادیر از توزیع‌های مربوط به هر X_i در رابطه (۲) انتخاب (نمونه‌گیری) می‌شود. این نمونه‌گیری با استفاده از تکنیک‌های خاص انجام می‌گردد. هر مجموعه از مقادیر داده‌ها، برای تخمین Y در رابطه (۲) استفاده می‌شود. این عمل برای تعداد دفعات بسیار زیاد (مثلاً 10^5 بار)، جهت به دست آوردن تعداد زیادی نمونه برای تخمین توزیع Y ، تکرار می‌شود. سپس نمونه‌های به دست آمده برای مقدار Y ، جهت به دست آوردن مشخصات و نمودار توزیع مربوطه استفاده می‌شود. در شکل ۲ چگونگی انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو نشان داده شده است.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$



شکل (۲): فرآیند شبیه‌سازی مونت‌کارلو [۱۳].

از مزایای شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌توان به نمونه‌گیری وسیع از بازه و المان‌های ورودی، استفاده مستقیم از مدل و اعتماد نکردن به مدل‌های جایگزین، عدم نیاز به اصلاح و دست‌کاری مدل اصلی و سادگی مفهوم و ساختار روش و سهولت استفاده از آن برای کاربردهای مختلف اشاره نمود. تنها عیب این روش، هزینه محاسباتی بالا می‌باشد [۱۳]. به عبارتی مجموعه از زیرسیستم‌ها با توابع توزیع چگالی احتمال خرابی، تحت تاثیر روش مونت‌کارلو، به تابع توزیع چگالی احتمال

اجزای مختلف از نقطه نظر قابلیت اطمینان و نیز تخصیص قابلیت اطمینان، برای ارائه پیشنهادهای جهت تغییر در طراحی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی می‌باشد.

۲- مفاهیم قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان عبارت از توانایی یک سیستم برای کارکردن تحت شرایط معین، برای یک دوره زمانی یا تعداد دفعات مشخص شده می‌باشد [۱]. قابلیت اطمینان، ویژگی‌های خرابی اجزای سیستم را با استفاده از تحلیل داده‌های خرابی و روش‌های آماری توصیف می‌کند [۱۰]. در ادامه توابع استفاده شده در بحث قابلیت اطمینان سیستم ارائه شده است.

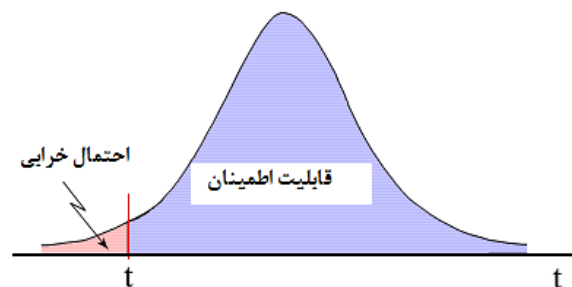
۲-۱- توابع مورد استفاده در بحث قابلیت اطمینان

در آمار و احتمالات، تابع چگالی احتمال به تابعی اطلاق می‌شود که توزیعی آماری را به شکل انتگرالی نمایش دهد. مقدار این تابع، همواره مثبت می‌باشد. در قابلیت اطمینان، انتگرال این تابع در یک بازه مشخص، نشان‌دهنده احتمال خرابی در آن بازه می‌باشد [۱۱ و ۱].

با توجه به اینکه در قابلیت اطمینان، احتمال کارکردن بدون خرابی مدنظر می‌باشد، بنابراین مفهوم ریاضی قابلیت اطمینان را می‌توان مطابق رابطه (۱) بیان نمود.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $f(x)$ بیانگر تابع چگالی احتمال می‌باشد. شکل ۱ نشان‌دهنده مفهوم خرابی و قابلیت اطمینان با رویکردی احتمالاتی می‌باشد. در این شکل، زمان t معرف زمانی است که قابلیت اطمینان در آن زمان محاسبه می‌گردد.



شکل (۱): مفهوم قابلیت اطمینان [۱].

۲-۲- شبیه‌سازی مونت‌کارلو

روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک روش نمونه‌گیری مصنوعی است که می‌تواند برای حل مسائل پیچیده در روابط تحلیلی و

خرابی‌های این ناحیه، توسط توزیع وایبل، گاما و... قابل مدل‌سازی می‌باشند [۱۴ و ۱۵].

ناحیه دوم: در این ناحیه توزیع خرابی کاملاً به صورت تصادفی بوده و غیرقابل پیش‌بینی است. کارآمدترین دوره عمر هر قطعه یا سیستم، این دوره محسوب می‌گردد. در این ناحیه نرخ خرابی ثابت می‌باشد. در این ناحیه، مقدار β برابر یک بوده و استفاده از توزیع نمایی که حالت خاصی از تویع وایبل است، برای مدل‌سازی رفتار خرابی سیستم، مقدر می‌باشد [۱۴ و ۱۵].

ناحیه سوم: هنگامی که قطعه عمر طبیعی خود را می‌کند و به اصطلاح دچار فرسودگی می‌شود، نرخ خرابی به‌طور فزاینده با گذر زمان افزایش می‌یابد. β در این ناحیه، بزرگتر از یک بوده و می‌توان از توزیع‌های احتمالاتی وایبل، نرمال، گاما و... استفاده نمود [۱۴ و ۱۵]. این ناحیه، در تحلیل خرابی‌های سیستم، اهمیت فراوانی دارد. علت این اهمیت، به تعیین سیاست‌های تعمیر و نگهداری جهت جلوگیری از وقوع خرابی‌ها می‌باشد [۱۵].

۲-۴- اهمیت قابلیت اطمینان

اهمیت قابلیت اطمینان، اندازه‌گیری و سنجش مقدار تأثیر هر قطعه روی قابلیت اطمینان کل سیستم است. یک راه ساده برای نشان دادن این موضوع، بررسی سیستم‌های سری می‌باشد. عموماً قطعه‌ای با پایین‌ترین مقدار قابلیت اطمینان، بیشترین اثر را بر روی قابلیت اطمینان سیستم خواهد داشت [۱۶]. اهمیت قابلیت اطمینان، هم به ویژگی‌های خرابی اجزا و هم به موقعیت اجزا در سیستم وابسته است. برای تعیین مقدار عددی اهمیت قابلیت اطمینان، باید نسبت مشتق قابلیت اطمینان سیستم را بر قابلیت اطمینان اجزای آن سیستم محاسبه نمود. مقدار اهمیت قابلیت اطمینان IR_i برای مؤلفه n ام در یک سیستم با n مؤلفه، توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود که در آن، R_s قابلیت اطمینان سیستم و R_i قابلیت اطمینان قطعه می‌باشد [۱].

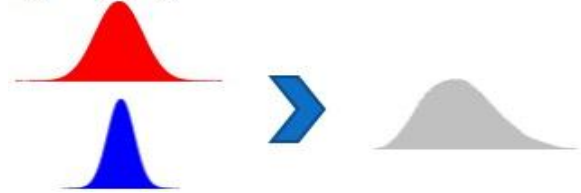
$$IR_i = \frac{\partial R_s}{\partial R_i} \quad (4)$$

۲-۵- تخصیص قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان یک محصول، تابع اجزای آن محصول است. قابلیت اطمینان یک سیستم زمانی قابل قبول و بالا خواهد بود که اجزای آن، قابلیت اطمینان بالایی داشته باشند. چگونگی

خرابی کل سیستم ختم می‌شوند. فرآیند انجام‌شده در این مقاله به‌صورت شماتیک در شکل ۳ به نمایش درآمده است.

داده‌های غیرقطعی



شکل (۳): فرآیند روش مونت کارلو در استفاده از توزیع‌های آماری غیرقطعی.

۲-۳- نرخ خرابی

نرخ خرابی بیانگر احتمال خرابی یک وسیله‌ای است که درحال کارکردن می‌باشد. از منحنی وان حمام برای بیان مفهوم نرخ خرابی استفاده می‌شود. تابع نرخ خرابی برحسب زمان از رابطه (۳) به‌دست می‌آید. به‌دلیل اینکه سیستم بررسی شده، از نوع مکانیکی است، توزیع وایبل، توزیع مناسبی جهت به‌کارگیری در تحلیل خرابی اجزای سیستم‌های مکانیکی می‌باشد [۱۷ و ۱۸]. منحنی وان حمام که در شکل ۴ نمایش داده شده است، دارای سه ناحیه می‌باشد.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}}{\alpha^\beta \left(1 - \int_0^t \frac{\beta t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}}{\alpha^\beta} dt\right)} \quad (3)$$



شکل (۴): منحنی وان حمام [۱].

ناحیه اول: خرابی‌ها در این ناحیه اغلب به‌دلیل مشکلات اولیه در تولید و یا کیفیت ضعیف و سستی مواد اولیه اتفاق می‌افتند. در این ناحیه، مقدار پارامتر β کمتر از یک بوده و

۲-۶- مدل سازی قابلیت اطمینان

برای مدل سازی سیستم از دیدگاه قابلیت اطمینان، روش های متعددی وجود دارد. یکی از این روش ها، استفاده از دیاگرام های بلوکی قابلیت اطمینان می باشد. با استفاده از این روش، چگونگی ارتباط اجزای یک سیستم از لحاظ قابلیت اطمینان، نشان داده می شود. نتایج به دست آمده از این روش میزان احتمال خرابی سیستم و نقاط بحرانی حاصل از خرابی را مشخص می کند که می توان با این شناخت، به بهبود طراحی و تقلیل احتمال خرابی پرداخت. پیکربندی های مختلفی در دیاگرام های بلوکی مورد استفاده قرار می گیرد که معروف ترین آنها پیکربندی سری و موازی می باشند. تحلیل قابلیت اطمینان عموماً به سه روش فیزیک خرابی، استفاده از داده های خرابی و روش ترکیبی که بر پایه ی استفاده توأم فیزیک خرابی و داده های خرابی است، قابل اجرا می باشد. برای انجام هر کدام از تحلیل های ذکر شده، مدل سازی سیستم تحت بررسی ضروری می باشد [۱].

۲-۷- انواع داده های خرابی

داده های خرابی انواع مختلفی دارند که از آن جمله می توان به داده های اختصاصی، داده های عمومی و تخمین های کارشناسانه، اشاره نمود. داده های اختصاصی یک سیستم، با استفاده از اطلاعات به دست آمده از فرآیند تعمیرات و نگهداری در طول عمر عملکرد سیستم، با توجه به اهداف خاص، جمع آوری می شود. داده های عمومی با استفاده از دستگاه ها یا سیستم های مشابه قابل جمع آوری هستند. نمونه های مشهور داده های عمومی در دنیا، بانک داده های خرابی اوردا [۹]، MIL-HDBK-217F [۱۹] و آراماس [۲۰] می باشند. این داده ها به عنوان یک منبع مناسب به خصوص در مرحله طراحی اولیه تجهیزات که داده های تجربی و اختصاصی وجود نداشته باشد، قابل استفاده می باشند. توجه به این نکته ضروری است که در صورت استفاده از داده های عمومی، بایستی نظر کارشناسانه نیز در استفاده از آنها لحاظ گردد، زیرا شرایط عملکردی و محیطی برای سیستم های مختلف، دارای تفاوت های اساسی می باشند.

۳- موتور توربوفن

بعد از سال ۱۹۴۰ که موتورهای توربینی ساخته شدند، سازندگان هواپیماهای نظامی و تجاری به دلیل مزایای این

تخصیص منطقی قابلیت اطمینان برای هر یک از قطعات سیستم، برای دستیابی به قابلیت اطمینان هدف، اهمیت زیادی دارد [۱۷]. تخصیص قابلیت اطمینان سیستم با حل نامعادله اساسی (۵) سروکار دارد که \hat{R}_i پارامتر تخصیص قابلیت اطمینان برای زیرمجموعه \hat{A}_i ، R^* پارامتر قابلیت اطمینان مورد نیاز سیستم و f تابع ارتباطی بین قابلیت اطمینان سیستم و زیرمجموعه ها می باشد [۱۸].

$$f(\hat{R}_1, \hat{R}_2, \dots, \hat{R}_n) \geq R^* \quad (5)$$

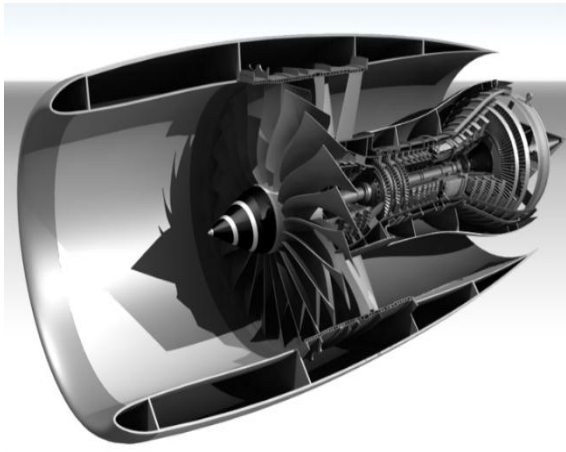
۲-۵-۱- تخصیص قابلیت اطمینان در حالت بهینه شده

هزینه

یکی از روش های موجود برای تخصیص قابلیت اطمینان، روش بهینه شده هزینه می باشد. تابع نمایش داده شده در رابطه (۶) به نام تابع هزینه، بیانگر تابع پنهانی می باشد و f نشان دهنده امکان پذیری افزایش قابلیت اطمینان می باشد که می تواند در مسایل مربوط به هزینه، بیانگر هزینه باشد. تابع مذکور، بیان می کند که امکان پذیری افزایش قابلیت اطمینان با افزایش f بالا و بالاتر می رود و این افزایش از نوع نمایی می باشد. دشواری در افزایش سطح قابلیت اطمینان به دلایل متعددی مانند مسایل طراحی، سطح فناوری و... رخ می دهد. اساس این روش بدین گونه است که، ابتدا میزان امکان پذیری بهبود کیفیت جزء با انتخاب اعدادی بین صفر (ساده) تا یک (سخت) تعیین می گردد. سپس حداکثر قابلیت اطمینان قابل دستیابی (که معمولاً برابر ۱ در نظر گرفته می شود) مشخص شده و طی معادله (۶)، میزان قابلیت اطمینان مورد نیاز در جزء جهت رساندن قابلیت اطمینان سیستم به قابلیت اطمینان هدف، بدست می آید.

$$C_i(R_i) = e^{(1-f) \frac{R_i - R_{\min,i}}{R_{\max,i} - R_i}} \quad (6)$$

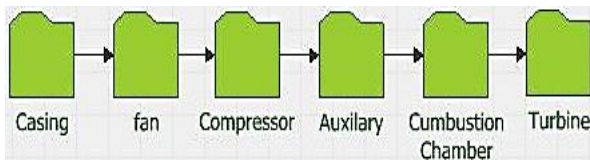
در رابطه (۶)، f میزان امکان پذیری بهبود قابلیت اطمینان جزء نسبت به اجزای دیگر، C_i تابع امکان پذیری (هزینه)، $R_{\max,i}$ حداکثر قابلیت اطمینان قابل دستیابی، $R_{\min,i}$ قابلیت اطمینان جزء، قبل از تخصیص می باشد. فاکتور امکان پذیری (f) تعریفی کیفی دارد که عددی بین صفر تا یک را شامل می شود. به گونه ای که اعداد با بزرگتر شدن، امکان پذیری کمتری را دارا خواهند بود.



شکل (۵): نمای برش خورده‌ی یک موتور توربوفن.

موتور توربوفن از زیرسیستم‌هایی تشکیل شده و اجزای اصلی تشکیل‌دهنده‌ی آن شامل فن، کمپرسور، محفظه‌ی احتراق، توربین، بدنه و متعلقات، سیستم روغن‌کاری، سیستم سوخت‌رسانی و گیربکس می‌باشد. هرکدام از این زیرسیستم‌ها، از اجزای دیگری تشکیل شده‌اند [۲۳].

جهت مدل‌سازی قابلیت اطمینان، ابتدا سیستم موردنظر به شش زیرسیستم اساسی مطابق شکل ۶ تقسیم‌بندی شده است. سپس بلوک‌ها، باتوجه به نحوه عملکردشان در موتور توربوفن از نقطه‌نظر قابلیت اطمینان، به‌صورت سری، موازی و یا سایر ساختارها به یکدیگر متصل می‌شوند. ساختار درنظر گرفته‌شده برای موتور توربوفن، به‌صورت سری می‌باشد، زیرا طبق مفهوم ساختار سری، اگر هرکدام از بلوک‌ها از کار بیفتند، موتور قادر به ادامه کار نخواهد بود. در این مقاله، روش مبتنی بر داده‌های خرابی برای انجام مدل‌سازی برگزیده شده است



شکل (۶): دیاگرام بلوکی قابلیت اطمینان برای موتور توربوفن

۴- اهداف طراحی

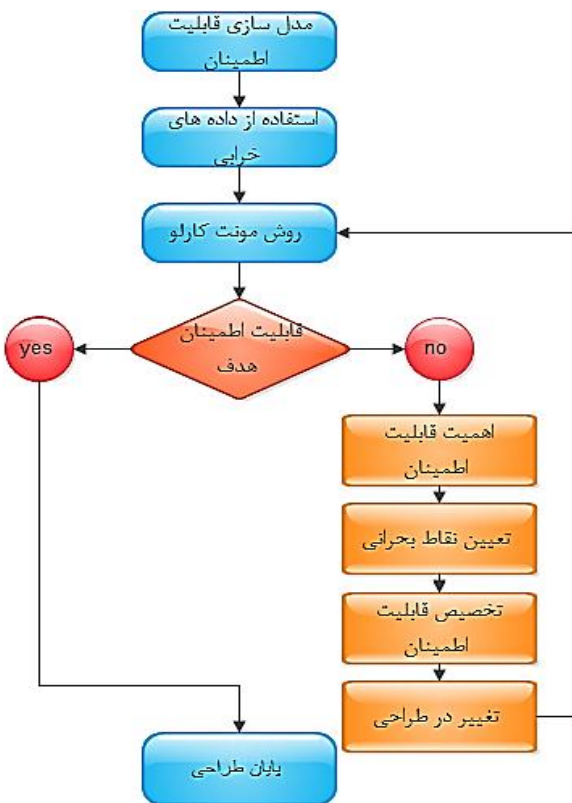
به‌عنوان هدف در این پژوهش، طراحی یک موتور توربوفن دومحوره سبک، برای مداومت پروازی ۳۰ ساعت در دستور کار قرار گرفته است. قابلیت اطمینان هدف برای سیستم، ۹۷

موتورها نسبت به موتورهای پیستونی، گرایش زیادی به استفاده از این موتورها پیدا کردند. برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ میلادی، مفهوم کنارگذر توسط شرکت رولز-رویس^۱ مطرح شده و بدین‌ترتیب موتور توربوفن به‌وجود آمد [۲]. در موتور توربوفن، یک پروانه بزرگ داخلی وجود دارد که به هوای ورودی شتاب می‌دهد. بخشی از این هوا وارد قسمت مرکزی موتور شده و احتراق روی آن انجام می‌گیرد و بخش دیگر هوای ورودی از لوله‌های تعبیه‌شده به خارج انتقال داده می‌شود [۲۱].

از لحظه شروع تولید محصول، همزادی به‌نام قابلیت اطمینان برای آن شکل می‌گیرد که در کلیه مراحل طراحی، تولید و بهره‌برداری وجود داشته و بر میزان فروش، رضایت‌مندی مشتری و طول عمر محصول، اثر می‌گذارد [۲۲]. نخستین گام برای بررسی و تحلیل هر سیستم از نقطه‌نظر قابلیت اطمینان، شناخت اجزای آن سیستم، نحوه آرایش اجزا در کنار هم و مودهای خرابی آن می‌باشد [۱۱]. تحلیل قابلیت اطمینان سیستم موتور توربوفن اندکی دشوار ولی با اهمیت است، زیرا شرایط کاری آن در آسمان به دور از دستان مهندسی‌ن بوده و در شرایط بحرانی امکان دارد با وجود یک خرابی، فاجعه‌ای جبران‌ناپذیر ایجاد گردد. از علت‌های دشواری و عدم قطعیت در بررسی قابلیت اطمینان موتور توربوفن، قابل پیش‌بینی نبودن برخی از شرایط عملکرد سیستم است. شاخص خرابی نیز، از جمله مواردی است که تعریف آن بر عهده‌ی طراحی یا استفاده‌کننده می‌باشد. اصولاً خرابی‌ها به دو گروه خرابی‌های سخت و خرابی‌های نرم تقسیم‌بندی می‌شوند. خرابی سخت، به نوعی از خرابی اطلاق می‌شود که در صورت وقوع، آن جزء، دیگر قابل استفاده نیست. در حالت خرابی نرم، جزء موردنظر دارای کیفیت اولیه نبوده و با کارایی پایین‌تری فعالیت می‌کند. اکثر خرابی‌ها در موتور توربوفن در شرایط عادی از نوع نرم هستند که بایستی به موقع، تشخیص داده شده و رفع گردند [۳].

۳-۱- اجزای موتور توربوفن

موتور توربوفن علاوه بر دارا بودن قسمت توربینی، دارای یک قسمت دیگر، برای عبور هوا و بدون تزریق سوخت می‌باشد. در شکل ۵ نمایی از یک موتور توربوفن نشان داده شده است [۲۱].



شکل (۷): الگوریتم روش استفاده شده جهت انجام محاسبات قابلیت اطمینان.

همان گونه که در بخش ۲ اشاره گردید از روابط حاکم بر قابلیت اطمینان جهت انجام محاسبات استفاده می شود. علت استفاده از روش مونت کارلو برای انجام محاسبات، غیرقطعی بودن داده های ورودی می باشد. به عبارتی بهتر، داده های ورودی مسئله، توزیع های آماری می باشند. بنابراین این ورودی ها، کاملاً غیرقطعی بوده و امکان استفاده از روش هایی مانند مونت کارلو، روش های قابلیت اطمینان مراتب اول و دوم وجود دارد. داده های اولیه برای محاسبات، براساس انتخاب تصادفی داده ها از بازه های ورودی که معرف توابع چگالی احتمال خرابی زیرسیستم ها هستند، در هر بار تکرار محاسبات انجام می شود. برای انجام محاسبات این تحقیق از تعداد ۱۰۰۰ تکرار استفاده شده است.

۷- نتایج قابلیت اطمینان برای موتور توربوفن

در این مرحله ویژگی های قابلیت اطمینان هر بلوک نشان داده شده در شکل ۶، اعمال می گردد. داده های ورودی مسئله،

درصد در نظر گرفته شده است، به گونه ای که سیستم بایستی در تمام طول مدت پرواز و ارایه سرویس، دارای حداقل قابلیت اطمینان ۹۷ درصد باشد. از دیگر ملزومات طراحی، عدم رویت وقوع خرابی قابل پیش بینی در موتور به مدت ۳۰۰ ساعت پروازی می باشد.

۵- فرضیات

جهت طراحی موتور توربوفن و استخراج داده های خرابی از منابع مختلف، داشتن درکی کافی از محیط کارکردی موتور ضروری می باشد. زیرا شرایط بحرانی کارکردی در میزان نرخ خرابی اجزا تاثیرگذار هستند. بدین ترتیب فرض می شود دمای هوایی که موتور در آن کار می کند می تواند بین ۶۰- تا ۵۰ درجه سانتی گراد متغیر باشد. ارتفاع پروازی ۱۵۰۰۰ متر و ارتفاع فرودگاه از سطح دریا ۲۰۰۰ متر است. رطوبت نسبی تا ۹۸ درصد در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد قابل تحمل بوده و حداکثر سرعت پروازی ۶۵۰ کیلومتر بر ساعت و حداقل آن ۱۸۰ الی ۲۲۰ کیلومتر بر ساعت می باشد.

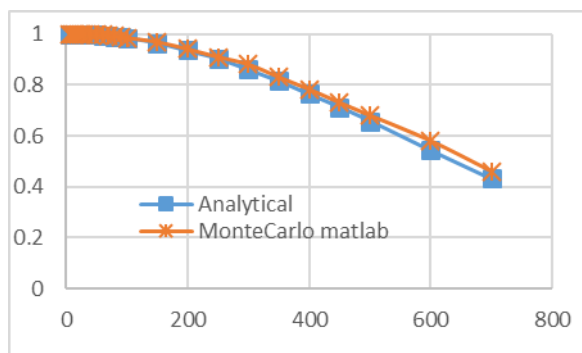
در این پژوهش، جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم موتور توربوفن در دست طراحی، اثر خرابی های ناگهانی مانند آسیب جسم خارجی در بررسی کمی قابلیت اطمینان وارد نمی گردد. فرض می شود که موتور از لحاظ عملکرد ترمودینامیکی، بدون نقص و کامل بوده و فعالیت آن در بحرانی ترین شرایط ممکن انجام شده و داده های خرابی با در نظر گرفتن شرایط سخت کارکردی استخراج می شود. همچنین در این تحقیق فرض می شود که سیستم در حال طراحی اولیه یا طراحی معکوس بوده و داده های اختصاصی برای عمر قطعات در دسترس نیست. همچنین از خطای انسانی در نصب و تجهیز قطعات روی موتور صرف نظر شده و فرض می گردد که زمان در این پروژه به معنی مجموع زمانی است که سیستم در حال کارکردن می باشد.

در این مقاله اثر زمان هایی که سیستم بدون فعالیت است، لحاظ نشده و فرض بر بدون نقص بودن وضعیت نگهداری می باشد. با توجه به فرضیات مسئله و محیط عملکردی موتور توربوفن، داده های خرابی برای اجزای هرکدام از زیر سیستم های نشان داده شده در شکل ۶ استخراج شده است.

۶- الگوریتم انجام محاسبات

روند انجام محاسبات در شکل ۷ نشان داده شده است.

همچنین در این پژوهش، مقایسه‌ای بین روش تحلیلی که از ضرب روابط حاکم بر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها به دست می‌آید و رابطه حاکم بر مونت کارلو انجام شده و در شکل ۸ مقایسه‌ای بین آن دو صورت گرفته است. نتایج به دست آمده از روش مونت کارلو در نرم افزار متلب با نتایج تحلیلی به دست آمده از روش تحلیلی براساس معادله (۷)، مقایسه شده است. نتایج در توافق قابل قبولی بوده و بیشترین خطا در حدود ۶ درصد است که ناشی از نوع نمونه‌گیری تصادفی در روش مونت کارلو و مرتبه گردشدن اعداد می‌باشد. شکل ۸ نشان‌دهنده این مقایسه می‌باشد.



شکل (۸): مقایسه روش‌های تحلیلی و مونت کارلو.

شایان ذکر است که، پژوهش صورت گرفته مبتنی بر طراحی اولیه سیستمی می‌باشد که هنوز تولید نشده و داده‌های تجربی در مورد آن در دسترس نیست. بنابراین اعتبار این کار به تعیین اهمیت قابلیت اطمینان اجزا و تخصیص قابلیت اطمینان برای بهبود قابلیت اطمینان آن پیش از تولید است. این پژوهش در مرحله قبل از فرآیند ساخت صورت گرفته و داده‌های مورد نیاز آن نیز با اعمال فاکتورهای تصحیح روی داده‌های خرابی عمومی به دست آمده است. ضرایب تصحیح متناسب با شرایط دمایی، فشاری و میزان بحرانیته در عملکرد قطعات مختلف در نظر گرفته شده است.

۷-۲- نتایج تخمین قابلیت اطمینان سیستم و تعیین

تابع چگالی احتمال

با توجه به شکل ۶ و مفهوم سیستم‌های سری در قابلیت اطمینان، برای اینکه سیستم بتواند کار کند، باید تمام اجزا کار کنند. بنابراین معادله قابلیت اطمینان سیستم موتور توربو فن مطابق رابطه‌ی (۷) به دست می‌آید:

شامل اطلاعات خرابی اجزای موتور توربو فن در قالب بازه‌های آماری می‌باشد. بدین ترتیب، حل مسئله با عدم قطعیت ناشی از داده‌های ورودی همراه خواهد بود. مطابق آنچه توضیح داده شد، در این مرحله، با استفاده از الگوریتم محاسبات، نتایج مربوط به قابلیت اطمینان به دست آمده است.

۷-۱- اعتبارسنجی و مقایسه

برای مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از محاسبات اهمیت قابلیت اطمینان، از داده‌های اختصاصی مربوط به دو هواپیمای A320 و Fokker 100 برحسب ساعت پروازی استفاده شده است. هدف در این بخش، مقایسه‌ی اهمیت قابلیت اطمینان اجزای موتور مدل‌سازی شده با داده‌های اختصاصی می‌باشد. مقدار MTBF یک جزء هرچه بیشتر باشد، آن جزء دیرتر دچار خرابی می‌شود و بنابراین قابلیت اطمینان بالایی داشته و اهمیت قابلیت اطمینان آن در سیستم، کم‌تر خواهد بود. با مقایسه کیفی داده‌های موجود در جدول ۱ و نتایج حاصل شده، این نتیجه حاصل می‌شود که بخش سوخت و روغن و بخش‌هایی از توربین و کمپرسور، اهمیت قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به سایر اجزا دارند. و این موضوع با ادعای این تحقیق در بخش بررسی اهمیت قابلیت اطمینان تطابق می‌باشد. از مفهوم متوسط زمان بین دو خرابی برای نشان دادن، کمترین قابلیت اطمینان بین زیرسیستم‌ها و در نتیجه، بالاترین اهمیت بین آنها استفاده شده است که نوعی بهره‌گیری کیفی بوده و استفاده کمی نشده است و به همین دلیل از آوردن روابط مذکور امتناع شده است.

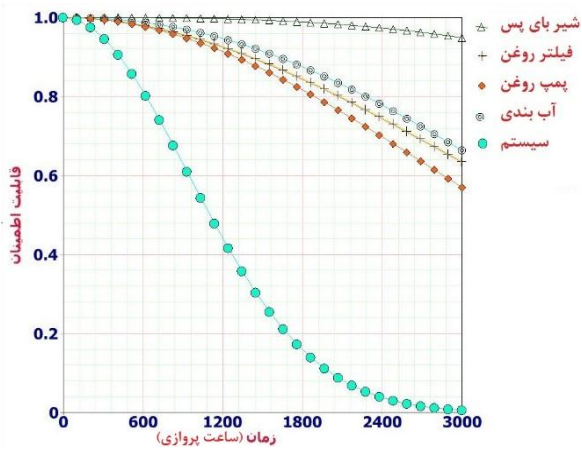
جدول (۱): متوسط زمان بین دو خرابی بر حسب ساعت

پروازی برای اجزای موتورهای هواپیماهای A320 و F100

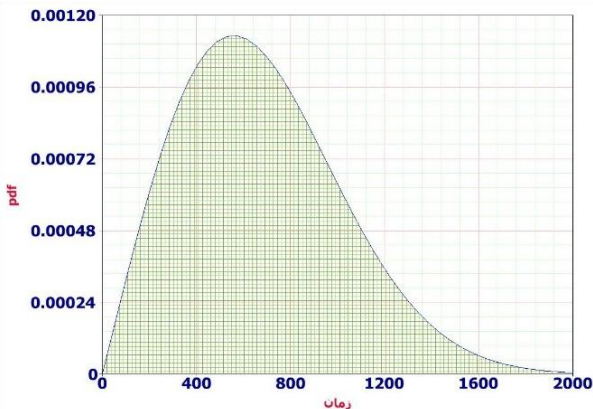
[۲۴].

جزء	MTBF
پمپ سوخت	۴۰۰۰
فیلتر سوخت	۳۰۰۰
فیلتر روغن	۳۰۰۰
پمپ روغن	۴۰۰۰
دیسک فن	۸۰۰۰
دیسک توربین	۷۰۰۰
دیسک کمپرسور	۷۰۰۰
پره فن	۹۰۰۰
پره توربین	۵۰۰۰
پره کمپرسور	۵۰۰۰

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که کم‌ترین قابلیت اطمینان بین زیر سیستم‌های موتور توربوفن، به زیرسیستم روغن اختصاص دارد. برای به‌دست‌آوردن توابع چگالی احتمال حاکم بر خرابی زیرسیستم‌ها و کل سیستم، از تکنیک ترسیم احتمالاتی استفاده شده است. جهت برازش منحنی‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار ایزی فیت استفاده شده است. در این نرم‌افزار، با موجود بودن منحنی به‌دست‌آمده از روش مونت کارلو، بهترین توزیع آماری برازش شده روی منحنی اولیه و پارامترهای آن توزیع را بر پایه روش بهترین برازش [۱۳ و ۱] پیشنهاد می‌کند. نمودار برازش شده برای تابع چگالی احتمال سیستم در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل (۱۱): تغییرات قابلیت اطمینان اجزای زیرسیستم کمکی برحسب زمان.

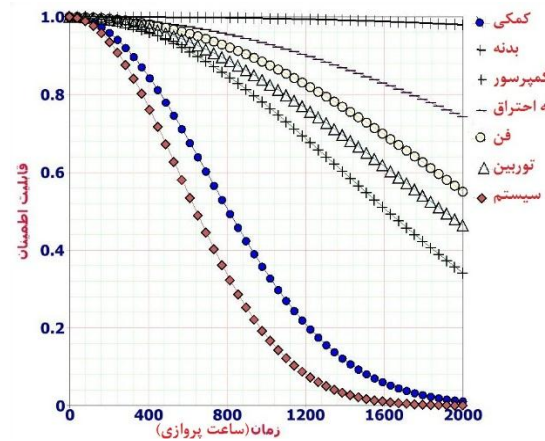


شکل (۱۲): نمودار تابع چگالی احتمال برازش شده برای رفتار خرابی موتور توربوفن.

طبق این روش، با تحلیل نتایج حاصل شده از روش مونت کارلو، می‌توان نتیجه گرفت که توزیع وایبل دو پارامتری، توزیعی مناسب جهت توجیه رفتار خرابی سیستم می‌باشد.

$$R_{sys} = \prod_{i=1}^n R_i \quad (7)$$

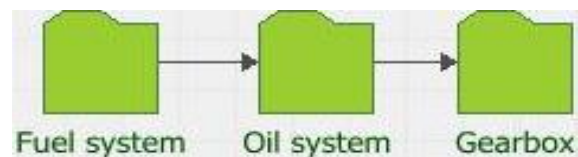
با استفاده از رابطه (۲) و کاربرد مونت کارلو در محاسبات مربوط به رابطه (۷) نتایج قابلیت اطمینان برای سیستم حاصل می‌شوند. شکل ۹ نشان‌دهنده نحوه تغییرات قابلیت اطمینان سیستم و زیرسیستم‌های آن در زمان‌های داده شده می‌باشد. با توجه به محاسبات انجام شده و نمودار ترسیم شده، زیرسیستم کمکی که خود، شامل زیرسیستم‌های سوخت، روغن و گیربکس می‌شود، قابلیت اطمینان پایین‌تری را نسبت به سایر بخش‌های موتور دارد.



شکل (۹): تغییرات قابلیت اطمینان اجزای موتور توربوفن برحسب زمان.

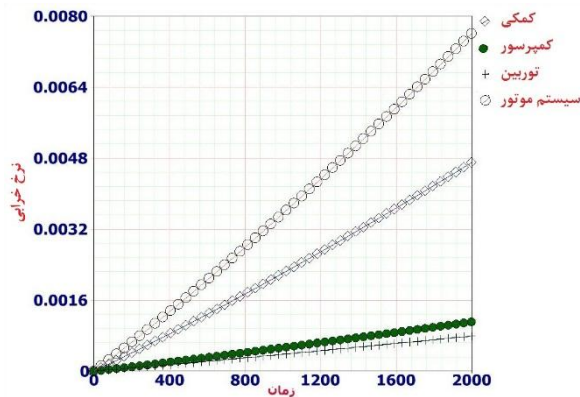
نتایج قابلیت اطمینان از روش مونت کارلو و روش تحلیلی، تفاوت چندانی با هم ندارند و شکل ۸ در اثبات این موضوع آورده شده است. به‌همین منظور در معادله (۸)، رابطه‌ی تحلیلی موجود برای محاسبه قابلیت اطمینان زیرسیستم کمکی آورده شده است. با در نظر گرفتن مدل قابلیت اطمینان زیرسیستم کمکی به‌صورت سری، مانند آنچه در شکل ۱۰ نشان داده شده است و اعمال رابطه (۸) نمودار تغییرات قابلیت اطمینان برای سیستم سوخت، روغن و گیربکس به‌دست آمده و در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

$$R_{Auxiliary} = R_{fuel} \times R_{gearbox} \times R_{oil} \quad (8)$$



شکل (۱۰): دیاگرام بلوکی برای زیرسیستم کمکی.

فرسودگی رفته رفته بیشتر می شود. میزان نرخ خرابی سیستم در ۱۰۰ ساعت برابر ۰/۰۰۰۳۱۹ بر ساعت و در ۴۰۰ ساعت برابر ۰/۰۰۱۳۳۷ بر ساعت می باشد.



شکل (۱۳): نمودار تغییرات نرخ خرابی بر حسب زمان برای زیرسیستم ها.

۷-۴- نتایج اهمیت قابلیت اطمینان

جهت پیداکردن اجزای بحرانی در هر سیستم، بایستی تحلیل اهمیت قابلیت اطمینان انجام گیرد. قابلیت اطمینان از روش مونت کارلو به دست آمد و نتایج تحلیلی نیز صحت آن را اثبات نمود. با استفاده از این نتایج، و بهره گیری از رابطه (۴)، نتایج موجود در جدول ۳ به دست آمده است. محاسبات بر فرض اینکه، اجزا از لحاظ احتمالاتی، کاملاً جدا از هم باشند، انجام شده است. رابطه‌ی تحلیلی برای فن در ۱۵۰ ساعت پروازی، طی رابطه (۱۱) نیز ذکر شده است. طبق اعداد موجود در جدول ۳، می توان نتیجه گرفت که اهمیت قابلیت اطمینان در زیرسیستم کمکی که خود شامل زیرسیستم های گیربکس، روغن و سوخت است، از سایر زیرسیستم ها بالاتر است. بنابراین، زیرسیستم کمکی، جزء بحرانی مجموعه ی موتور می باشد که طبق شکل ۹، قابلیت اطمینان آن در ۲۰۰ ساعت پروازی، به زیر ۹۷ درصد نزول می کند. این موضوع با مشاهده شکل ۱۳ نیز قابل توجیه است، به طوری که در بین نمودارهای نرخ خرابی، نمودار زیرسیستم کمکی مقادیر زیادتری نسبت به سایر زیرسیستم ها دارد. بنابراین، جهت بهبود سیستم و افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم، بایستی زیرسیستم کمکی در اولویت قرار گیرد. بنابراین با انجام تحلیل فوق، به این نکته پی برده شده است که زیرسیستم کمکی از اهمیت بالاتری نسبت به سایرین برخوردار است. این موضوع از روی نمودار شکل ۹

پارامترهای به دست آمده از این روش در جدول ۲ جمع آوری شده است.

جدول (۲): پارامترهای تخمین زده شده برای توزیع وایبل

زیرسیستم ها.

پارامتر α	پارامتر β	زیرسیستم
۲۱۰۳/۶۶	۲/۰۶	فن
۱۹۲۹/۹۱	۲/۰۵	کمپرسور
۳۵۹۹/۹۳	۲/۰۶	محفظه احتراق
۲۰۷۱/۴۲	۲/۰۵	توربین
۹۸۱۵/۷۴	۲/۵۴	بدنه
۱۵۶۹/۱۲	۲/۰۳	سوخت
۱۳۲۹/۷۴	۱/۹۹	روغن
۲۷۴۲/۵۳	۲/۰۰	گیربکس

توزیع وایبل مطابق رابطه (۹) بیان می گردد. با انجام روند ذکر شده، پارامترهای وایبل برای توزیع خرابی سیستم به صورت $\beta=۲/۰۴$ و $\alpha=۷۶۷/۹۲$ استخراج می شود و معادله خرابی برای موتور به صورت رابطه (۱۰) در می آید.

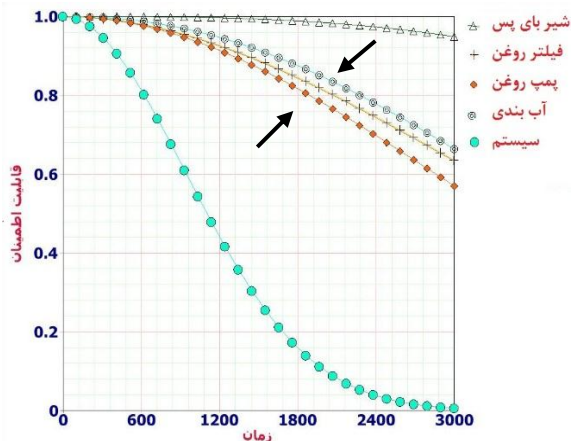
$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}}{\alpha^\beta} \quad (۹)$$

$$f_{system}(t) = \frac{2.04 t^{1.04} e^{-\left(\frac{t}{767.92}\right)^{2.04}}}{767.92^{2.04}} \quad (۱۰)$$

۷-۳- نتایج نرخ خرابی

محاسبات مربوط به نرخ خرابی براساس استفاده از رابطه (۳) صورت می گیرد. با بهره گیری از این رابطه، نمودارهای مربوط به نرخ خرابی اجزای سیستم به دست آمده و در شکل ۱۳ نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده، نرخ خرابی زیرسیستم کمکی، از سایر نرخ های خرابی سایر زیرسیستم ها بالاتر است. در نمودار شکل ۱۳ نرخ خرابی زیرسیستم های فن، محفظه احتراق، به ترتیب پایین تر از نمودار نرخ خرابی توربین قرار می گیرند که به دلیل اینکه خیلی نزدیک به محور افقی هستند، رسم نشده اند. نکته مهم در شکل ۱۳، تقعر مثبت نمودارهای نرخ خرابی می باشد. مثبت بودن این تقعر، نشان دهنده ی افزایش نرخ خرابی با گذر زمان می باشد. به عبارتی دیگر، سیستم موتور توربوفن تحت بررسی، در حال فرسودگی با زمان است و این

داده شده است. در شکل ۱۴، ناحیه‌ای توسط دو فلش مشخص شده است، مربوط به نمودارهای قابلیت اطمینان سیستم‌های پمپ و فیلتر موجود در سیستم روغن کاری می‌باشد. در ضمن در شکل ۱۴ از آوردن نمودارهای اجزایی که قابلیت اطمینان بالاتری دارند، صرف‌نظر شده است.



شکل (۱۴): تغییرات قابلیت اطمینان اجزای زیرسیستم روغن با زمان.

۷-۵- نتایج تخصیص قابلیت اطمینان

همان‌گونه‌که ذکر گردید، تخصیص قابلیت اطمینان بر اجزای سیستم زمانی صورت می‌گیرد که، سیستم موردنظر نتواند یک قابلیت اطمینان مشخص را در زمان تعریف شده داشته باشد. به‌عبارتی، تخصیص قابلیت اطمینان، نوعی بهینه‌سازی سیستم در حالت مفهومی می‌باشد. با استفاده از این روش برای قابلیت اطمینان اجزا مقادیری پیشنهاد می‌شود به‌طوری‌که سیستم کلی بتواند به سطح قابلیت اطمینان هدف برسد. منظور از بهینه‌کردن در این مقاله، افزایش قابلیت اطمینان سیستم و رساندن به قابلیت اطمینان هدف، تحت قیود امکان‌پذیری افزایش قابلیت اطمینان بوده است، به‌طوری‌که تحت قید فاکتورهای f تعریف‌شده برای هر جزء، قابلیت اطمینان کل سیستم به سطح موردنظر ارتقا یابد.

طبق محاسبات صورت‌گرفته قابلیت اطمینان سیستم کلی بعد از ۱۵۰ ساعت پروازی به زیر ۹۷ درصد می‌رسد که این خلاف ملزومات در نظر گرفته‌شده برای طراحی می‌باشد. همچنین مطابق ملزومات طراحی، سیستم موتور توربوپن، بایستی بتواند تا ۳۰۰ ساعت پروازی دارای قابلیت اطمینان بالای ۹۷ درصد را داشته باشد. در این مقاله، از روش

نیز قابل توجه می‌باشد، به‌طوری‌که کمترین قابلیت اطمینان را در بین نمودارهای موجود، زیرسیستم کمکی دارا است.

$$IR_i = \frac{\partial R_s}{\partial R_i} \Big|_{150} = \frac{\partial (R_{fan} \times R_{Compressor} \times R_{Turbine})}{\partial R_{fan}} \Big|_{150} \times \frac{\partial (R_{C.Chamber} \times R_{Auxiliary})}{\partial R_{fan}} \Big|_{150} = 0.967 \quad (11)$$

جدول (۳): میزان اهمیت قابلیت اطمینان برای اجزای مختلف موتور توربوپن.

زمان (ساعت پرواز)	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
فن	۰/۹۶۷	۰/۹۴۲	۰/۹۱۰	۰/۸۷۳
کمپرسور	۰/۹۶۹	۰/۹۴۵	۰/۹۱۶	۰/۸۸۱
توربین	۰/۹۶۷	۰/۹۴۳	۰/۹۱۲	۰/۸۷۵
کمکی	۰/۹۸۹	۰/۹۷۵	۰/۹۶۱	۰/۹۴۵
محفظه احتراق	۰/۹۶۵	۰/۹۳۹	۰/۹۰۶	۰/۸۶۷

جدول (۴): میزان اهمیت قابلیت اطمینان در زیرسیستم کمکی.

زیرسیستم	گیربکس		روغن		سوخت	
	R	RI	R	RI	R	RI
۱۵۰	۰/۹۹۷	۰/۹۸۱	۰/۹۸۷	۰/۹۹۱	۰/۹۹۴	۰/۹۸۴
۲۰۰	۰/۹۹۵	۰/۹۶۵	۰/۹۷۷	۰/۹۸۳	۰/۹۸۸	۰/۹۷۲
۳۰۰	۰/۹۸۸	۰/۹۲۳	۰/۹۴۹	۰/۹۶۱	۰/۹۷۳	۰/۹۳۸
۵۰۰	۰/۹۶۷	۰/۷۹۷	۰/۸۶۶	۰/۸۹۱	۰/۹۲۱	۰/۸۳۸

جهت فهم عمیق این‌که در داخل زیرسیستم کمکی، کدام یک از زیرسیستم‌ها و اجزا دارای اهمیت بالاتری از دید قابلیت اطمینان هستند، تحلیل اهمیت قابلیت اطمینان روی اجزای زیرسیستم کمکی، مجدداً صورت گرفته و نتایج در جدول ۴ آورده شده است. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۴ حاکی از آن است که زیرسیستم روغن، اهمیت بالاتری نسبت به سایرین دارد. اگر برای اجزای تشکیل‌دهنده این زیرسیستم، ساختار سری در نظر بگیریم، با توجه به داده‌های خرابی و انجام دوباره محاسبات برای زیرسیستم روغن، می‌توان دریافت که اهمیت پمپ‌ها و سپس فیلترهای روغن در زیرسیستم روغن کاری، بالاتر از سایر اجزای آن است. این موضوع در شکل ۱۴ نمایش

شفت، بدنه، یاتاقان، آببندها و... تشکیل شده است. برای ارتقای قابلیت اطمینان پمپ، تخصیص قابلیت اطمینان روی اجزای پمپ صورت گرفته و بعد از تشخیص مودهای خرابی حاکم بر آنها و ایجاد تغییرات در طراحی جهت حذف برخی مودهای خرابی، نرخ خرابی اجزا کاهش یافته و قابلیت اطمینان پمپ افزایش می‌یابد.

۱۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روشی جهت محاسبات قابلیت اطمینان موتور توربوفن در مرحله طراحی و در نبود داده‌های خرابی اختصاصی سیستم معرفی شده است. بنابراین با اعمال الگوریتم پیشنهاد شده و لحاظ نمودن داده‌های خرابی، نتایج مربوط به قابلیت اطمینان به دست می‌آید. طبق محاسبات انجام شده، قابلیت اطمینان سیستم به زیر ۹۷ درصد در ۱۵۰ ساعت می‌رسد. با توجه به اهداف طراحی، این مقدار کافی نبوده و از روش تخصیص قابلیت اطمینان برای افزایش سطح قابلیت اطمینان سیستم به ۹۷ درصد در ۳۰۰ ساعت پروازی استفاده شده است. بخش دیگری از نتایج به تشخیص قطعات بحرانی در سیستم از نظر خرابی و قابلیت اطمینان می‌باشد. طبق تحلیل صورت گرفته، فیلترها و پمپ‌های روغن از بحرانی‌ترین اجزای موتور توربوفن مورد نظر می‌باشند. همچنین با استفاده از استخراج نمودارهای نرخ خرابی، این نتیجه حاصل می‌شود که سیستم، تحت فرسودگی بوده و بایستی سیاست تعمیرات و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان در طراحی لحاظ گردد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی به موضوع قابلیت دسترسی و برنامه تعمیرات و نگهداری نیز پرداخته شود.

۱۴- مراجع

1. Modarres, M., Kaminskiz, M. and Krivstov, V. "Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide", CRC Press, Boca Raton (Florida), 1999.
2. El-Sayed, A.F. "Aircraft propulsion and gas turbine engines", CRC Press, Boca Raton (Florida), 2008.
3. Avontuur, G.C. and Van der Werff, K. "An Implementation of Reliability Analysis in the Conceptual Design Phase of Drive Trains", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 73, No.2, pp. 155-165, 2001.
4. O'Halloran, B.M., Hoyle, C., Stone, R.B. and Tumer, I.Y. "The Early Design Reliability Prediction Method" in ASME 2012 International

بهینه‌سازی هزینه، جهت انجام عمل تخصیص استفاده شده است. دلیل انتخاب روش بهینه‌سازی هزینه، پویابودن این روش و ساده بودن ایجاد تغییرات در استفاده از آن است. روش‌های دیگر تخصیص قابلیت اطمینان، مقدار نرخ خرابی را در تمام مدت کار سیستم، ثابت فرض می‌کنند و توزیع مورد استفاده برای آنها بایستی توزیع نمایی باشد. در حالی که طبق نتایج اخذ شده، توزیع حاکم بر رفتار سیستم از نوع توزیع وایبل می‌باشد.

با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان هدف به صورت ۹۷ درصد در ۳۰۰ ساعت و اختصاص فاکتورهای امکان‌پذیری به هر کدام از زیرسیستم‌ها و اجزا، مطابق جدول ۵، نتایج مربوطه استخراج شده است. استنباط اصلی از این بخش، به این صورت است که برای رساندن قابلیت اطمینان سیستم در ۳۰۰ ساعت پروازی به مقدار ۹۷ درصد، بایستی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها برابر قابلیت اطمینان هدف که در جدول ۵ محاسبه شده است، باشد. بدین ترتیب، بایستی از اجزایی استفاده نمود که متوسط زمان تا خرابی آنها بزرگ‌تر از مقدار متوسط زمان تا خرابی اجزای کنونی باشد. به عبارتی ساده‌تر، اجزا باید کیفیت خوبی داشته و دیرتر خراب شوند. با تکیه بر این روش، محاسبات برای سایر اجزای موتور، انجام شده و در جدول ۵ به آنها اشاره شده است.

جدول (۵): نتایج تخصیص قابلیت اطمینان روی اجزای موتور

قابلیت اطمینان هدف	f	اهمیت قابلیت اطمینان	قابلیت اطمینان اولیه	زیرسیستم
۰/۹۹۶۰۹۱	۰/۵	۰/۸۷۲۹۱۹	۰/۹۸۹۹۰۰	فن
۰/۹۹۳۰۷۷	۰/۵	۰/۸۸۳۲۹۶	۰/۹۷۸۲۷۰	کمپرسور
۰/۹۹۴۴۳۸	۰/۵	۰/۸۶۹۲۹۱	۰/۹۸۴۳۶۸	توربین
۰/۹۹۷۷۶۷	۰/۵	۰/۸۷۷۸۲۴	۰/۹۹۴۰۳۱	م.احتراق
۰/۹۹۶۲۸۶	۰/۵	۰/۹۳۷۸۰۵	۰/۹۷۲۵۸۷	سوخت
۰/۹۹۳۷۶۵	۰/۵	۰/۹۶۱۰۱۹	۰/۹۴۹۰۹۴	روغن
۰/۹۹۸۱۰۹	۰/۵	۰/۹۲۳۰۷۷	۰/۹۸۸۱۰۶	گیربکس
۰/۹۹۹۸۰۸	۰/۷۵	۰/۸۶۴۲۶۸	۰/۹۹۹۸۰۸	بدنه

برای مثال وقتی گفته می‌شود که قابلیت اطمینان زیرسیستم روغن بایستی از مقدار ۰/۹۴۹۰۹۴ به مقدار ۰/۹۹۳۷۶۵ برسد، لازم است مسئله تخصیص روی آن زیرسیستم بسط داده شود و در این مرحله از اجزایی با قابلیت اطمینان بالاتر جهت ارضای هدف، استفاده گردد. برای نمونه، یکی از اجزا مانند پمپ، از بخش‌های مختلفی مانند پروانه،

22. Dhillon, B.S. "Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers", CRC Press, Boca Raton Florida, 2006.
23. Onvani, A. "Gas Turbines (Industrial, Aircraft)", Arkan Press, Edition 2, 2010 (in Persian).
24. Maintenance Report of Civil Aviation Organization of Islamic Republic of Iran, 2013.
- Mech. Eng. Congress and Exposition, pp. 1765-1776, 2012.
5. Patowary, A., Hazarika, J. and Sriwastav, G. "Estimation Of Reliability In Interference Models Using Monte Carlo Simulation", Reliability: Theory and Applications 7 , Vol.1, No.2, pp. 78-84, 2012.
6. Mettas, A. "Reliability Allocation and Optimization for Complex Systems", in Reliability and Maintainability Symposium, 2000, Proceedings. Annual, IEEE, pp. 216-221, 2000.
7. Weckman, G., Shell, R. and Marvel, J. "Modeling the Reliability of Repairable Systems in the Aviation Industry", Computers & industrial engineering, Vol. 40, No.1, pp. 51-63, 2001.
8. Kamyab Moghadas, R. and Fadaee, M.J. "Reliability Assessment of Structures by Monte Carlo Simulation and Neural Networks", Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), Vol. 13, No.1, pp. 79-88, 2012.
9. OREDA Participants. "Offshore Reliability Data Handbook, 4th ed. Norway, Trondheim, 2002.
10. Nachlas, J.A. "Reliability Engineering: Probabilistic Models and Maintenance Methods", CRC Press, Boca Raton, Florida, 2005.
11. Blischke, W.R. and Murthy, D.P., "Case Studies in Reliability and Maintenance", Vol. 480, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2003.
12. Kroese, D.P., Taimre, T. and Botev, Z.I. "Handbook of Monte Carlo Methods", Vol. 706, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2011.
13. Modarres, M. "Risk analysis in engineering: techniques, tools, and trends", CRC Press, Boca Raton, Florida, 2006.
14. O'Connor, A.N. and Kleyner, A. "Probability Distributions Used in Reliability Engineering", John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, 2011.
15. Marquez, A.C. "The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance", Springer Science & Business Media, New York, 2007.
16. Leemis, L.M. "Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods", Prentice-Hall, Inc., 1995.
17. Malaiya, Y.K. "Reliability Allocation", Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability, John Wiley & Sons, Online Library, 2008.
18. Yadav, O.P., Singh, N. and Goel, P.S. "Reliability Demonstration Test Planning: A Three Dimensional Consideration", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 91, No. 8, pp. 882-893, 2006.
19. Handbook Military. "Reliability Prediction of Electronic Equipment", MILHDBK-217F, Department of Defense, Washington, 1991.
20. Center, Naval Surface Warfare. "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", Carderock Division, 1992.
21. Mattingly, J. and Von Ohain, H. "Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, 2006.