

# آنالیز پیش‌بینی روند خرابی و تعمیرپذیری یک موتور مینی توربوفن از منظر داده‌های آماری به‌منظور کاربرد در یک پهپاد

جاماسب پیرکندی<sup>۱</sup>، مهدی جهرمی<sup>۲</sup>، مجتبی محمدپور<sup>۳</sup>

۱ استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران، j\_pirkandi@dena.kntu.ac.ir

۲ استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران

۳ کارشناس ارشد، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰

## چکیده

در این مقاله یک موتور مینی توربوفن مورد استفاده در یک پهپاد با مداومت پروازی بالا در مرحله طراحی انتخاب و تحلیل‌های مربوط به پیش‌بینی قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری آن انجام شده است. مدلسازی موتور توربوفن با استفاده از دیگرام‌های بلوکی انجام شده و قابلیت اطمینان، اهمیت قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی موتور و اجزای آن به‌دست آمده است. قابلیت اطمینان موتور در ۱۲۶ ساعت پروازی به زیر ۹۸ درصد می‌رسد. جهت ارتقای سطح قابلیت اطمینان موتور، از تخصیص قابلیت اطمینان ۹۸ درصد برای ۲۵۰ ساعت پرواز استفاده شده است. قابلیت دسترسی موتور توربوفن تحت بررسی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تحلیل شده و مقدار آن برای سه سال برابر با ۰/۷۵۳ درصد برآورد شده و سیاست تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه پیشنهاد شده است.

## واژگان کلیدی

موتور مینی‌توربوفن، پهپاد، روند خرابی، تعمیرپذیری

### ۱. مقدمه

به‌طور کامل و قطعی<sup>۱</sup> قابل شناسایی و درک نبوده و بر این اساس، پیش‌بینی خرابی و تحلیل قابلیت اطمینان، اساساً یک فرایند احتمالاتی است [۱]. هر سیستمی که در معرض تنش‌های مکرر و خارج از حد ظرفیت قرار بگیرد، امکان کاهش بازدهی و کارایی آن وجود دارد؛ 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،

امروزه با افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولاتی با قابلیت اطمینان بالا، عملکرد صحیح و قابل اطمینان محصولات تولیدشده، بیش از پیش مهم و اساسی شده است. از دید قابلیت اطمینان، زمانی یک طراحی کامل و بی‌نقص خواهد بود که سیستم مورد نظر در طول مأموریت تعیین‌شده، مؤثر و فعال باشد و بدون خرابی و خلل در عملکرد به هدف تعیین‌شده برسد. در یک طراحی، عواملی که به شکل بالقوه می‌توانند منجر به خرابی،

شناخت دقیق حالت‌های بحرانی سیستم و پتانسیل‌های شکست، برای بهبود طراحی و جلوگیری از آن امری ضروری به‌نظر می‌رسد [۲].

در صنایع حساس و پرخطر، استفاده از اصول مهندسی قابلیت اطمینان بخش جدایی‌ناپذیر طراحی و نگهداری محسوب می‌شود. با توجه به اینکه این علم در نبود مستشاران خارجی و وجود تحریم‌ها، در ایران قدری دچار کم‌توجهی شده است، تلاش برای گسترش آن در تحقیقات علمی و کاربردی‌سازی ضروری است. در پروژه حاضر، یک موتور توربوفاصل با مشخصات موتور AI25-TL مورد استفاده در یک پهپاد از دیدگاه قابلیت اطمینان مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. روش طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان، روشی نوین در دنیا و با شناختی محدود در ایران است. در پژوهش حاضر، با استفاده از پایه و اساس کارهای گذشته، الگویی جهت محاسبات قابلیت اطمینان یک سیستم مانند موتور توربوفاصل در مرحله طراحی و رساندن آن به سطح مورد انتظار قابلیت اطمینان بدون در اختیار داشتن داده‌های اختصاصی خرابی ارائه شده است.

آوانتور و همکاران (۲۰۰۱) یک روش تحلیل قابلیت اطمینان را به‌عنوان ابزاری در فاز طراحی مفهومی ارائه دادند [۳]. 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 زیادی برخوردار است. نتایج این پژوهش بیانگر افزایش قابلیت اطمینان سیستم در اثر اعمال تحلیل قابلیت اطمینان در فاز طراحی است. هالوران و همکاران (۲۰۱۲) روش پیش‌بینی قابلیت اطمینان جهت طراحی اولیه را مورد بررسی قرار داده‌اند [۴]. خروجی این روش مجموعه‌ای از طراحی‌هاست که می‌توانند شرط مقدار قابلیت اطمینان هدف را در آن طراحی ارضا کنند و حتی قابلیت اطمینان بیشتری از مقدار قابلیت اطمینان هدف داشته باشند. پس از جمع‌آوری داده‌ها و بررسی توزیع‌ها و حذف برخی از قطعات، گزینه‌های متنوع طراحی برای مشخص کردن اینکه کدام یک از آنها به قابلیت اطمینان هدف نزدیکتر است، بررسی می‌شود. پیتوری و همکاران (۲۰۱۲) 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 [۵]. ساموئل و همکاران (۲۰۰۰) محاسبات قابلیت اطمینان یک سیستم موتور توربوفاصل را با استفاده از تشخیص مودهای خرابی

و درخت خطا انجام داده‌اند [۶]. وکمن و همکاران (۲۰۰۱) نیز در پژوهشی با استفاده از فرایندهای وایبل و پواسون ناهمگن به مدلسازی عمر یک موتور جت پرداختند [۷]. مقدس و فدایی (۲۰۱۲) برای ارزیابی قابلیت اطمینان با بهره‌گیری توأمان از روش مونت کارلو و شبکه‌های عصبی مصنوعی، به بررسی قابلیت اطمینان سازه‌ای پرداختند [۸]. در این مقاله اجزای تشکیل‌دهنده سیستم و همچنین نحوه ارتباط آنها با هم، از منظر قابلیت اطمینان شناسایی شده و در گام بعد، به محاسبه قابلیت اطمینان، اهمیت اجزای مختلف از منظر قابلیت اطمینان و نیز تخصیص قابلیت اطمینان پرداخته شده است. نتایج حاصل شامل ارائه پیشنهادهایی جهت تغییر در طراحی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی و سیاست‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد. نوآوری این پژوهش، ارائه الگویی جهت محاسبات قابلیت اطمینان یک سیستم موتور توربوفاصل با اهداف خاص در مرحله طراحی و رساندن آن به سطح مورد انتظار قابلیت اطمینان و حفظ آن در شرایط مطلوب بدون در اختیار داشتن داده‌های اختصاصی خرابی می‌باشد.

## ۲. پهپادها

امروزه ارتش‌های جهان، جهت پیشبرد اهداف نظامی، شناسایی و فعالیت‌های نظیر آن از هواپیماهای بدون سرنشین استفاده می‌کنند. در طی پیشرفت‌های گسترده در این زمینه، روزه‌روز بر کارایی آنها افزوده شده و پارامترهایی چون مداومت پروازی، ارتفاع پرواز، قدرت مانور و جز این‌ها بهبود می‌یابند. پهپادهای ماتیس<sup>۱</sup>، آر. کیو. ۱۱<sup>۲</sup> ب<sup>۳</sup> فانتوم ری<sup>۴</sup> از نمونه‌های نوین این پهپادها هستند. برای نمونه، پهپاد آر. کیو. ۴ تا ارتفاع ۲۲ هزار متری اوج می‌گیرد و می‌تواند ۳۶ ساعت در آن ارتفاع بماند، همچنین می‌تواند در هر مأموریت ۴۰ هزار مایل هوایی گشت‌زنی کند. با داشتن یک مجموعه کامل از حسگرهای الکترونیکی نوری، فرسوخ و ترکیبی می‌تواند در هر زمان از روز و شب و در هر شرایط آب‌وهوایی به انجام مأموریت بپردازد. در مدل بزرگتر آن، فاصله نوک بال‌ها به ۴۰ متر می‌رسد [۹]. در شکل ۱ تصویر این هواپیما نمایش داده شده است. سیستم پیشران در پهپاد از جمله اصلی‌ترین بخش‌ها محسوب می‌شود و بسته به نوع کاربرد می‌توان از موتور جت استفاده کرد. برای این منظور، شناخت عملکرد موتور از منظر قابلیت اطمینان و طراحی موتور براساس آن، از اهداف این

موتور توربوفن به‌وجود آمد [۲]. در موتور توربوفن، یک فن بزرگ وجود دارد که به هوای ورودی شتاب می‌دهد. بخشی از این هوا وارد قسمت مرکزی موتور می‌شود و احتراق روی آن انجام می‌گیرد؛ بخش دیگر هوای ورودی از مجاری تعبیه‌شده را به خارج انتقال می‌دهد [۱۰].

پژوهش است. بعد از سال ۱۹۴۰ م، که موتورهای توربینی ساخته شدند، سازندگان هواپیماهای نظامی و تجاری به دلیل مزایای این موتورها نسبت به موتورهای پیستونی، گرایش زیادی به استفاده از این موتورها پیدا کردند. برای نخستین بار در دهه ۱۹۵۰ م، مفهوم کنارگذر توسط شرکت رولز رویس<sup>۵</sup> مطرح شد و بدین ترتیب



شکل ۱. پهپاد نورثروپ گرومن آر. کیو. ۴ گلوبال هاوک<sup>۶</sup>



شکل ۲. نمایی از یک موتور توربوفن AI25-TL

توسط شرکت ایفچنکو<sup>۷</sup> اوکراین نمایش داده شده است. این موتور دارای تراست ۱۶/۹ کیلونیوتن است و در هواپیماهای کوچک و آموزشی تجاری و نظامی و پهپادها مورد استفاده قرار گرفته است. وزن موتور ۳۵۰ کیلوگرم و طول موتور ۲۸۶ سانتی‌متر است. نخستین گام برای بررسی و تحلیل هر سیستمی از منظر قابلیت اطمینان، شناخت اجزای آن سیستم، نحوه آرایش اجزا در کنار هم و مودهای خرابی آن است [۱۲]. تحلیل قابلیت اطمینان سیستم موتورهای هوایی اندکی دشوار است؛ زیرا شرایط کاری

### ۳. موتور توربوفن انتخابی

موتور توربوفن علاوه بر هسته مرکزی موتورهای توربینی، دارای یک قسمت دیگر، برای عبور هوا و بدون تزریق سوخت است [۱۰]. این موتور از زیرسیستم‌هایی تشکیل شده و اجزای تشکیل‌دهنده آن شامل فن، کمپرسور، محفظه احتراق، توربین، بدنه و متعلقات، سیستم روغنکاری، سوخت‌رسانی و جعبه‌دنده کمکی است. هرکدام از این زیرسیستم‌ها، از اجزای دیگری تشکیل شده‌اند [۱۱]. در شکل ۲ موتور توربوفن AI25-TL تولیدشده

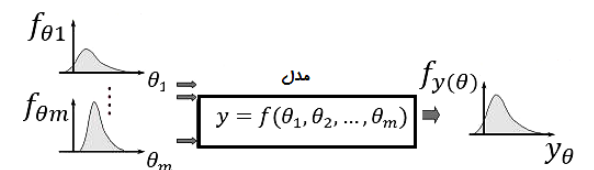
آن در آسمان به‌دور از دست مهندسان است. از علت‌های دشواری در بررسی قابلیت اطمینان موتور توربوپفن، نداشتن دقت بالا و قابل قبول در پیش‌بینی برخی از شرایط عملکردی سیستم به‌دلیل وجود عدم قطعیت است. شرایط آب‌وهوایی، محیطی و نظیر آنها نمونه‌هایی از این شرایط می‌باشند. شاخص خرابی نیز از جمله مواردی است که تعریف آن برعهده طراح یا استفاده‌کننده می‌باشد.

#### ۴. روابط حاکم

در آمار و احتمالات تابع چگالی احتمال به تابعی اطلاق می‌شود که توزیعی آماری را به‌شکل انتگرالی نمایش دهد. مقدار این تابع همواره مثبت است. در قابلیت اطمینان، انتگرال این تابع در یک بازه مشخص، نشان‌دهنده احتمال خرابی در آن بازه است [۱، ۱۲]. با توجه به آنکه در قابلیت اطمینان، احتمال کارکردن بدون خرابی مد نظر می‌باشد، مفهوم ریاضی قابلیت اطمینان را می‌توان مطابق رابطه ۱ بیان کرد. در رابطه ۱،  $f(x)$  بیانگر تابع چگالی احتمال،  $R$  نشان‌دهنده تابع قابلیت اطمینان و  $t$  معرف زمان است.

$$R(t) = \int_0^t f(t) dx \quad (۱)$$

روش شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۱</sup> یک روش نمونه‌گیری مصنوعی است که می‌تواند برای حل مسائل پیچیده در روابط تحلیلی و شبیه‌سازی مسائل آماری مورد استفاده قرار گیرد [۱۳-۱۴]. در این شبیه‌سازی مقادیر از توزیع‌های مربوط به هر  $x_i$  در رابطه ۲ انتخاب (نمونه‌گیری) می‌شود. این نمونه‌گیری‌ها با استفاده از تکنیک‌های خاص انجام می‌شود. 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 به‌دست آوردن تعداد زیادی نمونه برای تخمین توزیع  $Y$  تکرار می‌شود. سپس نمونه‌های به‌دست آمده برای مقدار  $Y$  جهت به‌دست آوردن مشخصات و نمودار توزیع مربوطه استفاده می‌شود. در شکل ۳ چگونگی انجام شبیه‌سازی مونت کارلو نمایش داده شده است.



شکل ۳. نمایی از فرایند شبیه‌سازی مونت کارلو [۱۴]

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (۲)$$

برای نمونه‌گیری از اعداد تصادفی استفاده می‌شود. با توجه به تراکم بالای مقادیر تابع چگالی احتمال ( $pdf$ ) در یک بازه کوتاه زمانی و عدم در نظرگیری این تراکم در نمونه‌گیری، روش مونت کارلو از تابع توزیع تجمعی ( $CDF$ ) به‌جای تابع چگالی احتمال برای نمونه‌گیری استفاده می‌کند. یکی از روش‌های تولید عدد تصادفی روش نمایی منفی است. با استفاده از تابع نمایی منفی می‌توان عدد تصادفی را تولید کرد. در این حالت اگر  $u$  یک متغیر تصادفی در بازه صفر تا ۱ باشد، می‌توان نوشت:

$$X = F_x^{-1}(u) \quad (۳)$$

$$\Pr(X < x) =$$

$$\Pr[F_x^{-1}(u) < x] = \Pr[u \leq F_x(x)] = F(x) \quad (۴)$$

نرخ خرابی بیانگر احتمال خرابی وسیله‌ای در حال کارکردن است. از منحنی وان حمام<sup>۲</sup> برای بیان مفهوم نرخ خرابی استفاده می‌شود [۱۵]. تابع نرخ خرابی بر حسب زمان از رابطه ۵ به‌دست می‌آید که در آن،  $h$  نشان‌دهنده نرخ خرابی یا تابع مخاطره<sup>۱</sup>،  $\alpha$  متغیر اندازه و  $\beta$  متغیر شکل در توزیع وایبل است [۱].

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}}{1 - \int_0^t \beta t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} dt} \quad (۵)$$

منحنی وان حمام دارای سه ناحیه است؛ ناحیه اول مربوط به خرابی‌های است که به‌دلیل مشکلات اولیه در تولید یا کیفیت ضعیف و سستی مواد اولیه ایجاد می‌شوند. در این ناحیه، مقدار پارامتر  $\beta$  کمتر از یک است [۱، ۱۵]. ناحیه دوم کارآمدترین دوره عمر هر قطعه یا سیستم محسوب می‌شود. در این ناحیه نرخ خرابی ثابت و توزیع خرابی کاملاً به‌صورت تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی است و مقدار  $\beta$  برابر با یک است [۱، ۱۵]. قطعه بعد از طی عمر طبیعی خود به اصطلاح دچار فرسودگی می‌شود، نرخ خرابی به‌طور فزاینده با گذر زمان افزایش می‌یابد و  $\beta$  در این ناحیه بزرگتر از یک است [۱، ۱۵]. ناحیه سوم، در تحلیل خرابی‌های سیستم اهمیت فراوانی دارد. علت این اهمیت تعیین سیاست‌های تعمیر و نگهداری جهت جلوگیری از وقوع خرابی‌هاست [۱۶]. اهمیت قابلیت اطمینان، اندازه‌گیری و سنجش مقدار تأثیر هر قطعه روی قابلیت اطمینان کل سیستم است [۱۷]. اهمیت قابلیت اطمینان، هم به ویژگی‌های خرابی اجزاء و هم به موقعیت اجزاء در سیستم وابسته است. مقدار اهمیت قابلیت اطمینان  $IR_i$  برای مؤلفه  $i$  ام در یک سیستم با  $n$  مؤلفه، توسط رابطه ۶ محاسبه

در آن  $u$  زمان فعال بودن در طول زمان،  $d$  زمان از کار افتادگی در طول زمان و  $t$  کل زمان عملیات است [۱].

$$A = \frac{u}{u+d} \quad (11)$$

تعیین قابلیت دسترسی کل سیستم بعد از مشخص شدن قابلیت دسترسی هر یک از اجزاء از اهمیت فراوانی برخوردار است. برای بیان قابلیت دسترسی سیستم، فرض فعال بودن سیستم بسیار مهم است. مقدار قابلیت دسترسی برای سیستم‌های سری با  $n$  مؤلفه و  $n$  نیروی کار در دسترس به صورت معادله‌های ۱۲ بیان می‌شود. این معادله، از مفهوم سیستم‌های سری در قابلیت اطمینان به دست می‌آید.

$$A_s(t) = \prod_{i=1}^n A_i(t) \quad (12)$$

داده‌های خرابی انواع مختلفی دارند که از آن جمله می‌توان به داده‌های اختصاصی، داده‌های عمومی و تخمین‌های کارشناسانه، اشاره کرد. داده‌های اختصاصی یک سیستم با استفاده از اطلاعات حاصل از فرایند تعمیرات و نگهداری در طول عمر عملکرد سیستم، با توجه به اهداف خاص، جمع‌آوری می‌شود. داده‌های عمومی با استفاده از دستگاه‌ها یا سیستم‌های مشابه قابل جمع‌آوری هستند. نمونه‌های مشهور داده‌های عمومی، بانک داده‌های خرابی OREDA [۲۰]، MIL-HDBK-217 [۲۱]، RMS [۲۲] و MIL-HDBK-756 [۲۳] می‌باشند. این داده‌ها به عنوان یک منبع مناسب به خصوص در مرحله طراحی اولیه تجهیزات که داده‌های تجربی و اختصاصی وجود نداشته باشد، قابل استفاده می‌باشند. توجه به این نکته ضروری است در صورت استفاده از داده‌های عمومی، باید نظر کارشناسانه نیز در استفاده از آنها لحاظ گردد؛ زیرا شرایط عملکردی و محیطی برای سیستم‌های مختلف، تفاوت‌های اساسی دارند.

### ۵. روند حل مسئله

پس از گردآوری داده‌های لازم و در نظر گیری توزیع‌های مناسب برای قابلیت اطمینان اجزاء، به مدل‌سازی سیستم و شبیه‌سازی آن با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو پرداخته شده است. دلیل استفاده از این روش، جامع‌تر بودن آن در انجام محاسبات برای متغیرهای تصادفی، نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد. چون توزیع وایبل، توزیعی مناسب برای عمر قطعات مکانیکی می‌باشد، کلیه شبیه‌سازی‌ها و محاسبات برای توزیع وایبل انجام گرفته است.

می‌شود که در آن  $R_s$  قابلیت اطمینان سیستم و  $R_i$  قابلیت اطمینان قطعه است [۱].

$$IR_i = \frac{\partial R_s}{\partial R_i} \quad (6)$$

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 تخصیص منطقی قابلیت اطمینان برای هر یک از قطعات سیستم برای دستیابی به قابلیت اطمینان هدف اهمیت زیادی دارد [۱۸]. تخصیص قابلیت اطمینان سیستم با حل نامعادله اساسی  $\gamma$  سروکار دارد؛ که  $\hat{R}_i$  پارامتر تخصیص قابلیت اطمینان برای زیرمجموعه  $\gamma$ ،  $R^*$  پارامتر قابلیت اطمینان مورد نیاز سیستم و  $f$  تابع ارتباطی بین قابلیت اطمینان سیستم و زیرمجموعه‌ها می‌باشد [۱۹].

$$(\hat{R}_1, \hat{R}_2, \dots, \hat{R}_n) \geq R^* \quad (7)$$

در روش تخصیص ARINC<sup>۱۱</sup> فرض بر این است تمامی زیرسیستم‌ها به صورت سری بوده و دارای نرخ خرابی ثابت می‌باشد و زمان عملکرد هر زیرسیستم با زمان عملکرد کل سیستم برابر است. در این روش تخصیص قابلیت اطمینان به هر یک از زیرسیستم‌ها براساس وزنی که به آنها داده شده است، انجام می‌گیرد. طی معادله ۸، نرخ خرابی تخصیص داده شده به سیستم میزان قابلیت اطمینان مورد نیاز در جزء جهت رساندن قابلیت اطمینان سیستم به قابلیت اطمینان هدف به دست می‌آید [۱۹].

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i^* \leq \lambda^* \quad (8)$$

$$\lambda_i^* = w_i \lambda^* \quad (9)$$

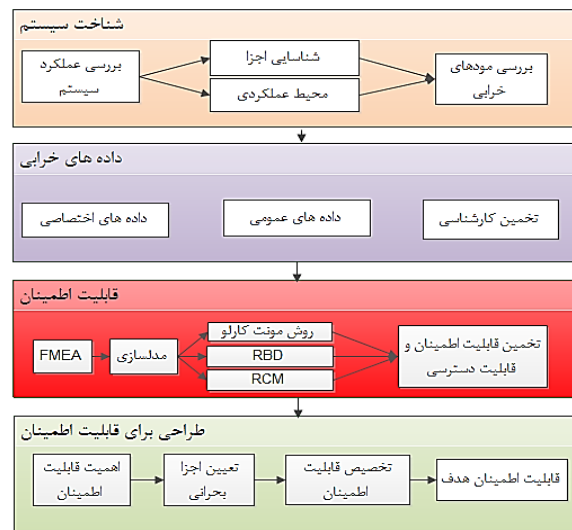
در رابطه ۸،  $n$  تعداد زیرسیستم‌ها بوده،  $\lambda_i^*$  مقدار نرخ خرابی تخصیص داده شده به زیرسیستم  $i$  ام و  $\lambda^*$  نرخ خرابی مورد نیاز سیستم است. در رابطه ۹،  $w_i$  فاکتور وزن برای هر یک از زیرسیستم‌ها با استفاده از رابطه ۱۰ تعیین می‌شود [۱۹].

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (10)$$

قابلیت دسترسی به اندازه‌گیری درجه آماده به کار بودن یک سیستم از آغاز مأموریت تا زمانی که برای مأموریت فراخوانده شود، می‌پردازد. از دیدگاه ریاضی، قابلیت دسترسی عبارت از اندازه زمان آماده به کار بودن سیستم نسبت به کل زمان عملیات ( $t = u + d$ ) بوده و در حالت کلی از رابطه ۱۱ به دست می‌آید که

دلیل انتخاب این توزیع، توانایی آن در مدلسازی قابلیت اطمینان قطعات در فازهای مختلف طول عمر می‌باشد. در مراحل بعدی، قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی کل سیستم محاسبه شده است. علاوه بر محاسبه این پارامترها، اهمیت اجزای مختلف از منظر قابلیت اطمینان و نیز تخصیص قابلیت اطمینان، برای ارائه پیشنهاداتی جهت بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. تمامی مراحل مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است. در انتها برای ارزیابی صحت نتایج حاصل از این روش، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهش‌هایی که با استفاده از داده‌های میدانی انجام شده و از لحاظ شرایط کاری و یا اجزای تشکیل‌دهنده مشابه آن می‌باشند صورت گرفته است. همچنین ارائه یک روش برای رفع چالش ارزیابی قابلیت

اطمینان سیستم‌هایی که به دلیل دسترسی نداشتن به داده‌های تجربی و اختصاصی، ارزیابی آنها با مشکل روبروست، از دیگر نوآوری‌های این مقاله محسوب می‌شود. حتی در حالتی که اطلاعات مربوط به داده‌های خرابی برای برخی از قطعات خاص در بانک‌های داده در دسترس نباشد، می‌توان از نظرات کارشناس بهره گرفت. همچنین در روش ارائه‌شده، علاوه بر قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی سیستم، اهمیت اجزای مختلف از منظر قابلیت اطمینان بررسی شده است. در انتها با تحلیل نتایج، پیشنهادهای لازم برای بهبود و رشد قابلیت اطمینان سیستم و نیز، در مورد ویژگی قابلیت اطمینان قطعات مختلف به‌کار رفته در سیستم و نحوه انتخاب آنها، ارائه شده است.



شکل ۴. روند ارائه‌شده برای ارزیابی و طراحی قابلیت اطمینان سیستم

## ۶. مدلسازی موتور

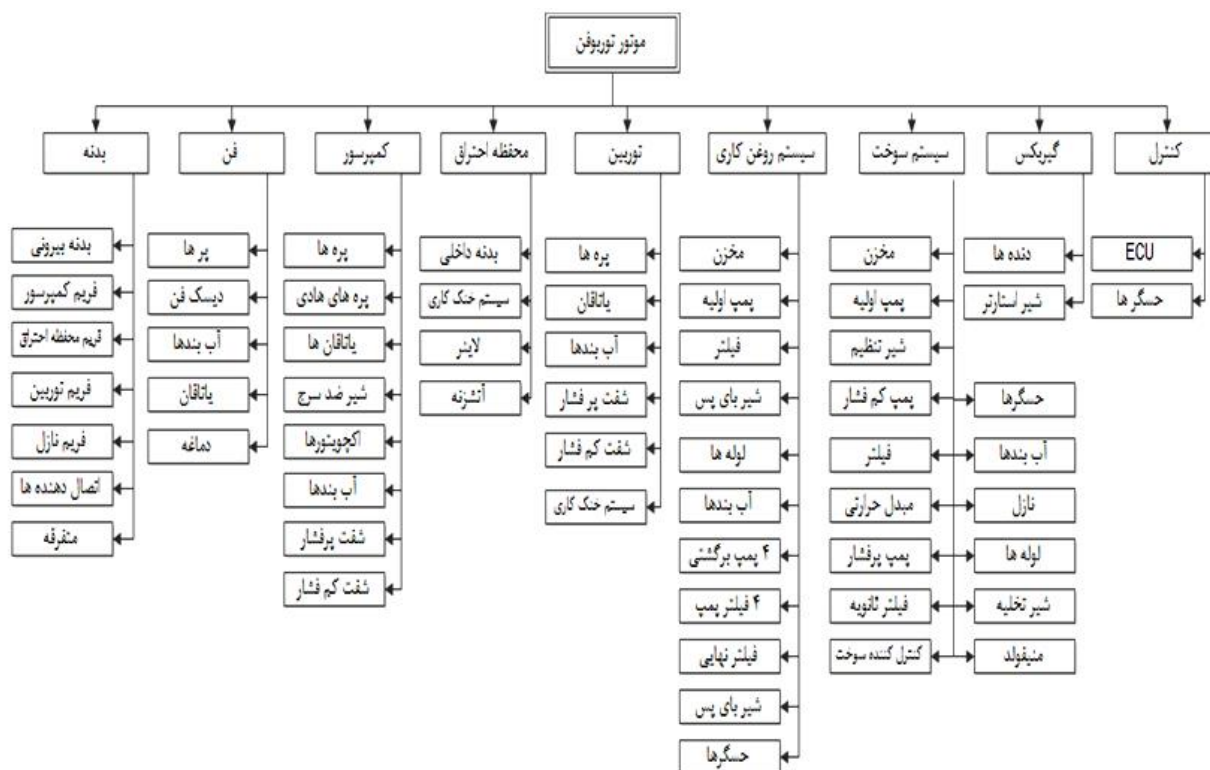
موتور توربوفن در معرض تنش‌های متعددی قرار دارد. هر سیستمی که در معرض تنش‌های مکرر یا خارج از حد توان قرار بگیرد، امکان کاهش بازدهی، کارایی و حتی خرابی آن وجود دارد. لذا شناخت حالت‌های بحرانی سیستم و پتانسیل‌های خرابی، برای بهبود طراحی و جلوگیری از رخداد آن امری ضروری است. تمامی خرابی‌های بالقوه در موتور توربوفن از عواملی اولیه حادث می‌شوند که باید بر آنها اشراف کافی داشت. در جدول ۱ به شایع‌ترین علل خرابی در اجزای مختلف موتور توربوفن اشاره شده است. اجزای کلی یک موتور توربوفن نمونه در شکل ۵ نمایش داده شده است. جهت مدلسازی قابلیت اطمینان، ابتدا سیستم موردنظر به ۶

زیرسیستم اساسی شامل فن، کمپرسور، محفظه احتراق، توربین، نازل خروجی، بدنه و متعلقات، سیستم روغن، سیستم سوخت و جعبه‌دنده تقسیم شده است. سپس این زیرسیستم‌ها با توجه به نحوه عملکردشان در موتور توربوفن از منظر قابلیت اطمینان، به‌صورت سری، موازی و یا سایر ساختارها به هم متصل می‌شوند. ساختار در نظر گرفته شده برای موتور توربوفن به‌صورت سری می‌باشد؛ زیرا طبق مفهوم ساختار سری، اگر هر کدام از بلوک‌ها از کار بیافتند، موتور قادر به ادامه کار نخواهد بود. بنابراین معادله قابلیت اطمینان سیستم موتور توربوفن مطابق رابطه ۱۳ به‌دست می‌آید. در این مقاله روش مبتنی بر داده‌های خرابی برای انجام مدلسازی انتخاب شده است.

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم موتور توربوفن در دست طراحی، اثر خرابی‌های ناگهانی مانند آسیب جسم خارجی در بررسی کمی قابلیت اطمینان وارد نمی‌گردد. فرض می‌شود که موتور از لحاظ عملکرد ترمودینامیکی، بدون نقص و کامل بوده و فعالیت آن در بحرانی‌ترین شرایط ممکن انجام شده و داده‌های خرابی با در نظر گرفتن شرایط سخت کارکردی استخراج می‌شود. همچنین در این تحقیق فرض می‌شود که سیستم در حال طراحی اولیه یا طراحی معکوس بوده و داده‌های اختصاصی برای عمر قطعات در دسترس نیست. همچنین از خطای انسانی در نصب و تجهیز قطعات روی موتور صرف‌نظر شده و فرض می‌شود که زمان در این پروژه به‌معنی مجموع زمانی است که سیستم در حال کار کردن می‌باشد. در این مقاله اثر زمان‌هایی که سیستم بدون فعالیت است، لحاظ نشده و فرض بر بدون نقص بودن وضعیت نگهداری می‌باشد.

$$R_{sys} = \prod_{i=1}^n R_i \quad (13)$$

به‌عنوان هدف در این مقاله، طراحی موتور مینی توربوفن دوحوره‌ای AI25-TL، برای مداومت پروازی ۲۵ ساعت در دستور کار قرار گرفته است. قابلیت اطمینان هدف برای سیستم، ۹۸ درصد در نظر گرفته شده است؛ به‌گونه‌ای که سیستم باید در تمام طول مدت پرواز و ارائه سرویس، دارای حداقل قابلیت اطمینان ۹۸ درصد باشد. از دیگر ملزومات طراحی، عدم رؤیت وقوع خرابی قابل پیش‌بینی در موتور به‌مدت ۲۵۰ ساعت پروازی می‌باشد. موتور طراحی‌شده باید برای سه سال در حالت تأمین قطعات و تعمیرات بتواند پاسخگوی نیازهای مأموریتی محول شده باشد. جهت طراحی موتور توربوفن و استخراج داده‌های خرابی از منابع مختلف، داشتن درکی کافی از محیط کارکردی موتور ضروری می‌باشد؛ زیرا شرایط بحرانی کارکردی در میزان نرخ خرابی اجزا تأثیرگذار هستند. بدین ترتیب فرض می‌شود در این پروژه، جهت



شکل ۵. اجزای موتور توربوفن

محاسبات استفاده می‌شود. علت استفاده از روش مونت کارلو برای انجام محاسبات، غیرقطعی بودن داده‌های ورودی است. داده‌های خرابی (ورودی‌های مسئله) توزیع‌های آماری می‌باشند. بنابراین با استفاده از تکرار محاسبات براساس انتخاب تصادفی داده‌ها از

## ۷. الگوریتم حل

روند انجام محاسبات در شکل ۶ نمایش داده شده است. روند مذکور تکامل یافته و جزئی‌شده شکل ۴ است. همان‌گونه که در بخش ۶ اشاره شد، از روابط حاکم بر قابلیت اطمینان جهت انجام

آزمایش ملاحظه شد طی ۱۰۰۰ تکرار، همگرایی صورت می‌گیرد. موتور توربوپمپ جهت انجام تحلیل‌های قابلیت اطمینان مدلسازی شده است. شکل‌های ۷ تا ۱۴ نشانگر این تقسیم‌بندی اجزاء و آرایش آنها در کنار هم براساس قرارگیری در یک موتور توربوپمپ واقعی است.

بازه‌های ورودی، محاسبات انجام می‌شود. در صورت بیشتر بودن تعداد تکرار (نمونه‌گیری از بازه‌های ورودی)، جواب به‌دست آمده از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود. برای انجام محاسبات این تحقیق از تعداد ۱۰۰۰ تکرار استفاده شده است. با توجه به استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو در این پژوهش، استفاده از تکرار محاسبات برای رسیدن به همگرایی ضروری است. با چندین بار

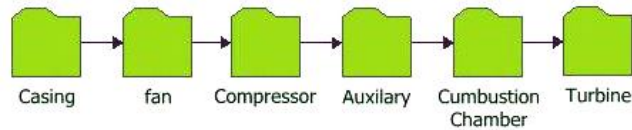
جدول ۱. شایع‌ترین علل خرابی در اجزای مختلف موتور توربوپمپ

علل خرابی	جزء	
خستگی کم‌چرخه و پرچرخه، آسیب جسم خارجی، تشدید ارتعاش، خوردگی، سایش	پره	فن
خستگی کم‌چرخه و پرچرخه، شکستگی	دیسک	
خستگی فرکانس بالا، تشدید ارتعاش، آسیب‌های اجسام داخلی و خارجی، خوردگی، سایش	پره	کمپرسور
خستگی کم‌چرخه و پرچرخه، شکستگی	دیسک	
خستگی دمایی، حرارت‌دهی بیش از حد	لایبر	محفظه احتراق
خستگی دمایی، خستگی فرکانس بالا، خزش، تشدید ارتعاش، خستگی کم‌چرخه در اثر گراپان‌های دمایی، سایدگی نوک پره، خوردگی، آسیب‌های اجسام داخلی	پره	توربین
شکستگی، خوردگی، خستگی کم‌چرخه و پرچرخه، خستگی دمایی	دیسک	
خوردگی داغ، خستگی دمایی، خزش، حرارت‌دهی بیش از حد، از بین رفتن پوشش، اعوجاج	پره‌های هادی	
خستگی کم‌چرخه، خزش در انتهای داغ، چرخش خیلی سریع		
خستگی کم‌چرخه، خزش در انتهای داغ، چرخش خیلی سریع		شفت پرفشار شفت کم‌فشار بدنه موتور یاتاقان‌ها
خوردگی، آسیب جسم خارجی		
خزش، خستگی کم‌چرخه		

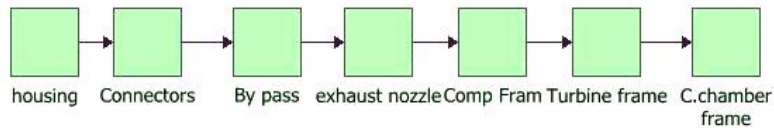


شکل ۶. الگوریتم حل مسئله

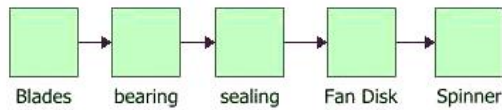




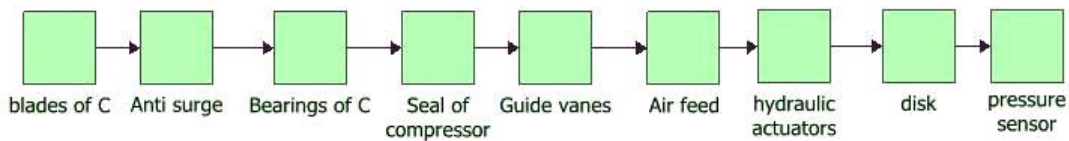
شکل ۷. زیرسیستم‌های استفاده‌شده در موتور توربوفن



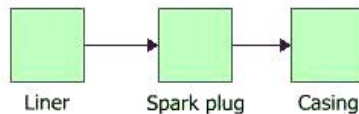
شکل ۸. اجزای در نظر گرفته شده برای زیرسیستم بدنه



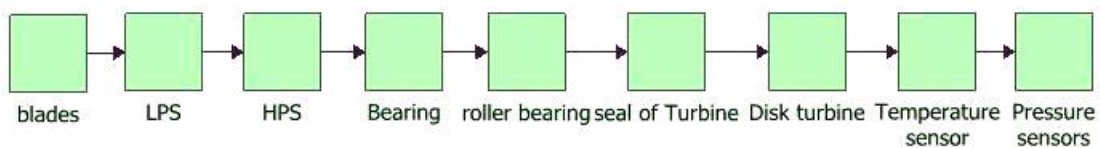
شکل ۹. اجزای در نظر گرفته شده برای زیرسیستم فن



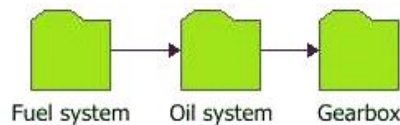
شکل ۱۰. اجزای در نظر گرفته شده برای زیرسیستم کمپرسور



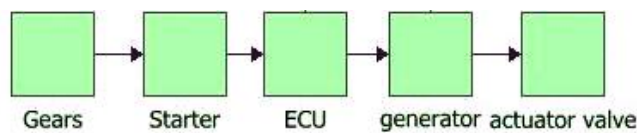
شکل ۱۱. اجزای در نظر گرفته شده برای زیرسیستم محفظه احتراق



شکل ۱۲. اجزای در نظر گرفته شده برای زیرسیستم توربین



شکل ۱۳. اجزای در نظر گرفته شده برای زیرسیستم کمکی



شکل ۱۴. اجزای در نظر گرفته شده برای زیرسیستم جعبه‌دنده

## ۸. اعتبارسنجی

برای مقایسه نتایج حاصل از محاسبات اهمیت قابلیت اطمینان، از داده‌های اختصاصی مربوط به دو هواپیمای ارباس ای. ۳۲۰<sup>۱۳</sup> و فوکر ۱۰۰<sup>۱۴</sup> استفاده شده است [۲۴]. در این بخش، هدف مقایسه اهمیت قابلیت اطمینان اجزای موتور مدلسازی شده با داده‌های اختصاصی است. مقدار MTBF<sup>۱۴</sup> یک جزء هرچه بیشتر باشد، آن جزء دیرتر دچار خرابی می‌شود و قابلیت اطمینان بالایی داشته و اهمیت قابلیت اطمینان آن در سیستم کمتر خواهد بود. با مقایسه کیفی داده‌های جدول ۲ و نتایج حاصل، این نتیجه به‌دست می‌آید که بخش سوخت و روغن و بخش‌هایی از توربین و کمپرسور، اهمیت قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به سایر اجزاء دارند. این موضوع با ادعای این تحقیق در بخش بررسی اهمیت قابلیت اطمینان مطابقت دارد و در نمودار شکل ۱۵ نیز به نمایش درآمده است که به‌وضوح شباهت رفتار در خرابی را نشان می‌دهد. تفاوت موجود نیز به‌دلیل عدم در دسترس بودن داده‌های حاصل از تست یا پرواز، تفاوت استفاده از موتورهای مقایسه شده از دید نظامی یا غیرنظامی، محیط و شرایط عملکردی متفاوت و سخت‌تر برای موتور در دست طراحی می‌باشد. در صورت استخراج داده‌های خرابی برای موتور تحت بررسی در شرایط عملکردی و محیطی یکسان با دو موتور ای. ۳۲۰ و اف. ۱۰۰ مشاهده می‌شود که رفتار متوسط زمان بین خرابی نه‌تنها با رفتار به‌دست آمده از داده‌های تجربی مشابه است، که خطای قابل قبولی بین نتایج وجود دارد که در بیشترین حالت به حدود ۱۲/۵ درصد در پمپ روغن می‌رسد. خطای موجود، به‌دلیل برخی ساده‌سازی‌های انجام‌شده، موجود نبودن تست‌های آزمایشگاهی یا میدانی در خصوص داده‌های خرابی و در نتیجه عدم قطعیت داده‌ها و مدل می‌باشد. مقدار MTTF یک جزء هرچه بیشتر باشد، آن جزء دیرتر دچار خرابی می‌شود و قابلیت اطمینان بالایی داشته و اهمیت قابلیت اطمینان آن در سیستم، کمتر خواهد بود. بحرانی‌ترین اجزای موجود در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تحلیل صورت گرفته برای یافتن اجزای بحرانی با قابلیت اطمینان کمتر صحیح بوده و با داده‌ها تجربی دو نمونه موتور هواپیمای تجاری در مطابقت نسبی قرار دارد. با توجه به داده با مقایسه کیفی داده‌ها و نتایج حاصل، این نتیجه به‌دست می‌آید که بخش سوخت و روغن و بخش‌هایی از توربین و کمپرسور، اهمیت قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به سایر اجزاء دارند. پمپ‌های

روغن و سوخت، فیلترها، دیسک‌های موجود در فن، کمپرسور و توربین، از حساس‌ترین بخش‌های این موتورها از لحاظ اهمیت قابلیت اطمینان محسوب می‌شوند.

جدول ۲. متوسط زمان بین دو خرابی برای اجزای موتور در هواپیماهای ای. ۳۲۰ و فوکر ۱۰۰ برحسب ساعت پروازی

جزء	MTBF	MTBF به‌دست آمده
پمپ سوخت	۴۰۰۰	۱۲۰۰
فیلتر سوخت	۳۰۰۰	۶۵۰
فیلتر روغن	۳۰۰۰	۶۵۰
پمپ روغن	۴۰۰۰	۱۲۰۰
دیسک فن	۸۰۰۰	۱۵۰۰
دیسک توربین	۷۰۰۰	۱۳۰۰
دیسک کمپرسور	۷۰۰۰	۱۳۰۰
پره فن	۹۰۰۰	۱۷۰۰
پره توربین	۵۰۰۰	۹۰۰
پره کمپرسور	۵۰۰۰	۱۰۰۰

## ۹. نتایج

در این مرحله ویژگی‌های قابلیت اطمینان هر زیرسیستم اعمال می‌گردد. داده‌های ورودی مسئله، شامل اطلاعات خرابی اجزای موتور توربوفن در قالب بازه‌های آماری می‌باشد. بدین ترتیب، حل مسئله با عدم قطعیت ناشی از داده‌های ورودی همراه خواهد بود. مطابق آنچه تشریح شد، در این مرحله با استفاده از الگوریتم محاسبات، نتایج مربوط به قابلیت اطمینان به‌دست آمده است. با توجه به مفهوم سیستم‌های سری در قابلیت اطمینان، با استفاده از رابطه ۲ و کاربرد روش مونت کارلو در محاسبات مربوط به رابطه ۱۱ نتایج قابلیت اطمینان برای سیستم حاصل می‌شوند. شکل ۱۷ نشان‌دهنده نحوه تغییرات قابلیت اطمینان سیستم و زیرسیستم‌های آن در زمان‌های داده شده می‌باشد. با توجه به محاسبات انجام‌شده و نمودار ترسیم‌شده، زیرسیستم کمکی که خود شامل زیرسیستم‌های سوخت، روغن و جعبه‌دنده کمکی می‌شود، قابلیت اطمینان پایین‌تری را نسبت به سایر بخش‌های موتور دارد. شکل ۱۸ نشان می‌دهد که کمترین قابلیت اطمینان بین زیرسیستم‌های موتور توربوفن، به زیرسیستم روغن اختصاص دارد. برای به‌دست آوردن توابع چگالی احتمال حاکم بر خرابی زیرسیستم‌ها و کل

سیستم موتور توربوفن تحت بررسی، در حال فرسودگی با زمان است و این 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 است. بنابراین، زیرسیستم کمکی، جزء بحرانی مجموعه موتور می باشد که طبق شکل ۷، قابلیت اطمینان آن در ۱۷۵ ساعت پروازی، به زیر ۹۸ درصد نزول می کند. این موضوع با مشاهده شکل ۱۸ نیز قابل توجه است؛ به طوری که در بین نمودارهای نرخ خرابی، نمودار زیرسیستم کمکی مقادیر زیادتری نسبت به سایر زیرسیستمها دارد. بنابراین، جهت بهبود سیستم و افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم، بایستی زیرسیستم کمکی در اولویت قرار گیرد. با انجام تحلیل فوق، این نکته دریافت شده است که زیرسیستم کمکی از اهمیت بالاتری نسبت به سایرین برخوردار است. این موضوع از روی نمودار شکل ۱۷ نیز قابل توجه است، به طوری که کمترین قابلیت اطمینان را در بین نمودارهای موجود، زیرسیستم کمکی داراست. شکل ۲۰، مربوط به نمودارهای قابلیت اطمینان سیستمهای پمپ و فیلتر موجود در سیستم روغنکاری است.

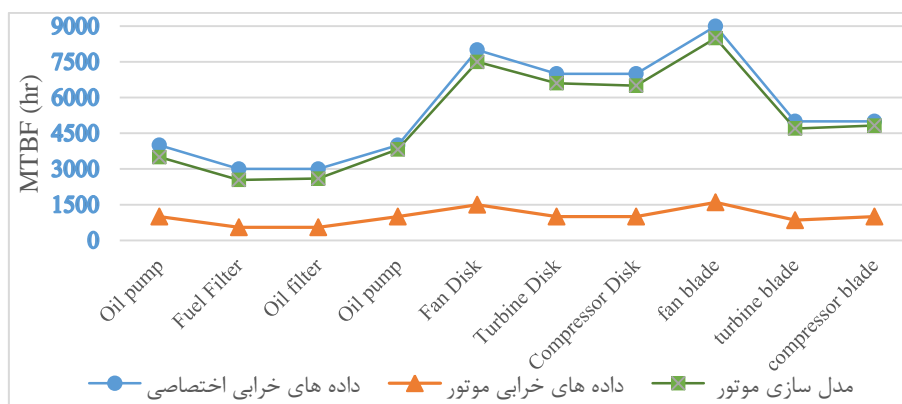
سیستم، از روش ترسیم احتمالاتی استفاده شده است. پارامترهای حاصل از این روش در جدول ۳ جمع آوری شده است. توزیع وایبل مطابق رابطه ۱۴ بیان می گردد.

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}}{\alpha^\beta} \quad (14)$$

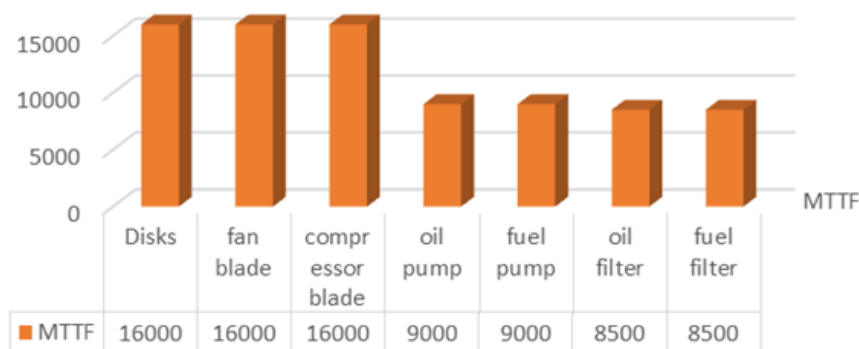
با انجام روند ذکر شده، پارامترهای وایبل برای توزیع خرابی سیستم به صورت  $\beta=2/04$  و  $\alpha=767/92$  استخراج می شود و معادله خرابی برای موتور به صورت رابطه ۱۵ درمی آید.

$$f_{system}(t) = \frac{2.04t^{1.04} e^{-\left(\frac{t}{767.92}\right)^{2.04}}}{767.92^{2.04}} \quad (15)$$

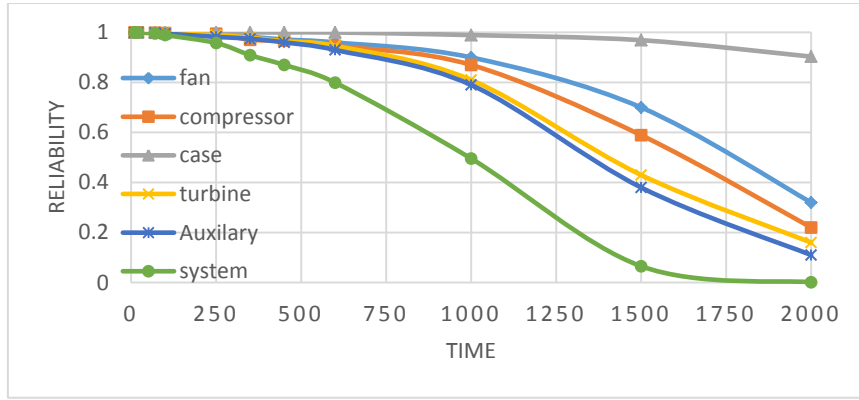
نمودارهای مربوط به نرخ خرابی اجزای سیستم به دست آمده و در شکل ۱۹ نمایش داده شده است. در شکل ۱۹ نرخ خرابی زیرسیستمهای فن، محفظه احتراق، به ترتیب پایین تر از نمودار نرخ خرابی توربین قرار می گیرند که به دلیل اینکه خیلی نزدیک به محور افقی هستند، رسم نشده اند. نکته مهم در شکل ۱۹، تقعر مثبت نمودارهای نرخ خرابی می باشد. مثبت بودن این تقعر، نشان دهنده افزایش نرخ خرابی با گذر زمان است. به عبارت دیگر،



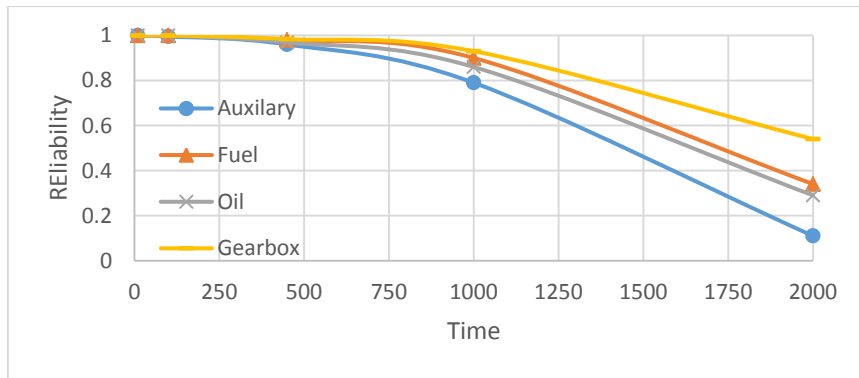
شکل ۱۵. اعتبارسنجی مدل مورد استفاده



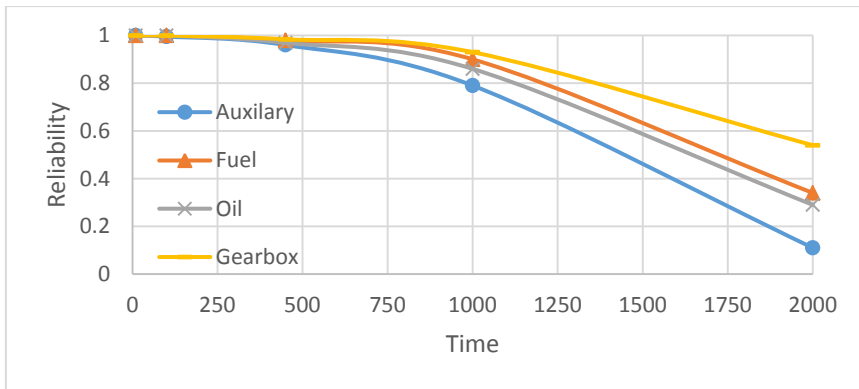
شکل ۱۶. متوسط زمان بین خرابیهای اجزای موتورهای توربوفن تجاری برای برخی از اجزای بحرانی [۲۴]



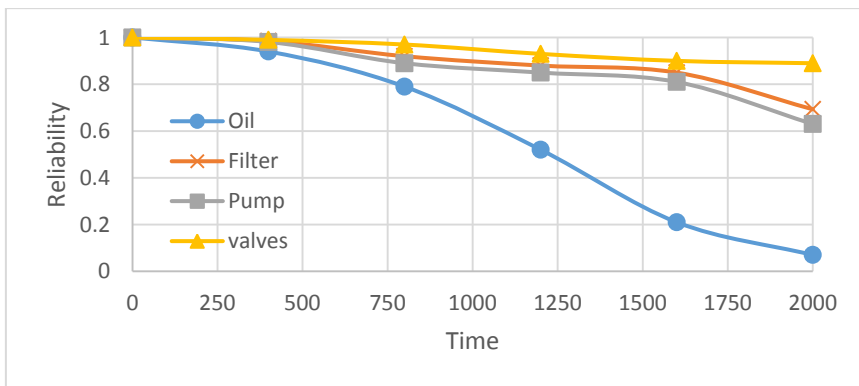
شکل ۱۷. تغییرات قابلیت اطمینان اجزای موتور توربوفاّن بر حسب زمان



شکل ۱۸. تغییرات قابلیت اطمینان اجزای زیرسیستم کمکی بر حسب زمان



شکل ۱۹. نمودار تغییرات نرخ خرابی بر حسب زمان برای زیرسیستم‌ها



شکل ۲۰. تغییرات قابلیت اطمینان اجزای زیرسیستم روغن با زمان

زمان‌بندی تقویمی استفاده شده است. با در نظر گرفتن میزان قابلیت اطمینان در زمان‌های مختلف برای اجزاء و اهمیت قابلیت اطمینان آنها در سیستم، تغییراتی در سیاست تعمیر و نگهداری ایجاد کرده و زمان‌های بین بازه‌های تعمیرات، برابر ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ساعت تقویمی فرض می‌شود. نتیجه انجام شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰ تکرار برای ۳ سال عملکرد موتور توربوفن در جدول ۳ نشان داده شده است. شکل ۲۲ نیز نشان‌دهنده تغییرات قابلیت دسترسی موتور در بازه زمانی ۲۰۰۰ ساعت اولیه و شکل ۲۳ مربوط به قابلیت دسترسی در ۱۹۲۰ ساعت انتهایی می‌باشد. محاسبات صورت‌گرفته نشان‌دهنده این است که از ۲۱۶۰۰ ساعت عملکرد مورد انتظار، تنها ۱۹۸۰۲ ساعت محقق شده و تفاوت این دو زمان صرف عملیات تعمیر و نگهداری پیشگیرانه خواهد شد. در شکل ۲۴ قابلیت دسترسی متوسط برای سیستم نمایش داده شده است. طبق محاسبات صورت‌گرفته در ۳ سال، سیستم دارای قابلیت دسترسی متوسط ۷۵ درصد است. به این معنا که میزان ۷۵ درصد از کل ۳ سال را می‌تواند به کار گرفته شود و مابقی زمان را باید تحت تعمیرات قرار گیرد. بیان این نکته نیز ضروری است که ۲۵ درصد باقی‌مانده، جزء زمان‌هایی است که سیستم بلااستفاده است. این زمان برای یک ماه برابر ۲۷۰ ساعت است که برای سه سال برابر ۹۷۲۰ ساعت می‌شود که معادل ۳۷ درصد کل سه سال است.

در این پروژه، سیاست تعمیر و نگهداری براساس تعمیر و نگهداری پیشگیرانه<sup>۱۵</sup> طرح‌ریزی شده است. چون مدت کار سیستم ۳ سال در نظر گرفته شده است، با فرض اینکه هر پرواز، ۳۰ ساعت به طول بینجامد و به‌طور متوسط در هر ماه ۱۵ پرواز در نظر گرفته شود، مدت زمان کل پرواز در سه سال برابر ۲۱۶۰۰ ساعت خواهد بود. بدیهی است که در این مدت اگر فرایند تعمیرات و نگهداری مناسبی روی موتور صورت نگیرد، سیستم بارها دچار خرابی می‌شود؛ زیرا در این زمان، قابلیت اطمینان صفر است. از طرفی عملکرد موتور در بازه‌های زمانی مختلف در شکل ۲۱ به صورت شماتیک نمایش داده شده است. خانه‌هایی که به رنگ زرد مشخص شده است، نشان‌دهنده زمان‌هایی است که موتور بدون فعالیت<sup>۱۶</sup> می‌باشد و خانه‌های سبز رنگ زمان‌هایی است که موتور در حال کار<sup>۱۷</sup> است. بدین ترتیب برنامه تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه بهتر است در زمان‌های بیکاری صورت گیرد. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، میزان آماده به کار بودن سیستم موتور توربوفن از اهمیت زیادی برخوردار است. در زمان‌های طولانی، قابلیت اطمینان سیستم در صورت عدم تعمیر به صفر می‌رسد، اما نوع سیاست تعمیر و نگهداری است که سیستم را می‌تواند با قابلیت اطمینان مناسبی آماده به کار نگه دارد. هدف در این بخش، انجام محاسبات مربوط به قابلیت دسترسی در زمان محاسبه‌شده ۳ سال می‌باشد. برای انجام این محاسبات، از



شکل ۲۱. نمایش شماتیک از فعالیت موتور در طی زمان

جدول ۳. نتایج کلی محاسبات قابلیت دسترسی برای موتور توربوفن در مدت ۳ سال

ویژگی‌های عمومی	
متوسط قابلیت دسترسی	۰/۷۵۳
انحراف معیار (متوسط قابلیت دسترسی)	۰/۰۰۱۶
قابلیت دسترسی در ۲۵۹۲۰ ساعت	۰/۹۰۸
مدت زمان عملیات و از کار افتادگی سیستم	
مدت زمان عملیات (ساعت)	۱۹۸۰۲
کل زمان از کار افتادگی (ساعت)	۱۸۲۹

نتیجه انجام شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد. با توجه داده‌های این جدول نتیجه گرفته می‌شود که در برخی از زمان‌ها، میزان از کار

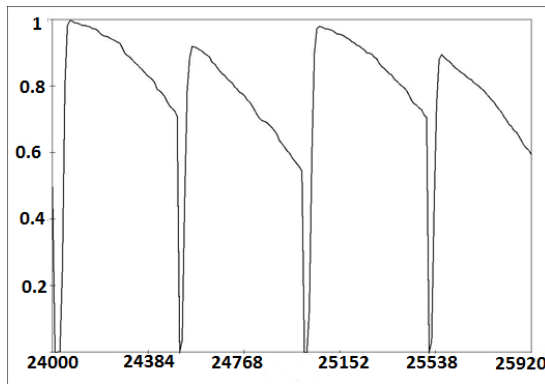
میزان آماده به کار بودن و از کار افتادگی موتور برای انجام فرایند تعمیرات و نگهداری در جدول ۴ آمده است. این داده‌ها

افتادگی سیستم، نسبت به سایر زمان‌ها بیشتر است. این موضوع که به‌خاطر وجود دوره‌های تعمیرات کلی یا اورهال می‌باشد که البته، هر چقدر این دوره به حداقل زمان ممکن کاهش یابد، سیستم به بهینه‌ترین حالت خود می‌رسد. نتیجه محاسبات برای قابلیت دسترسی در جدول ۵ آمده است. این جدول نگاهی کلی به قابلیت دسترسی دارد.

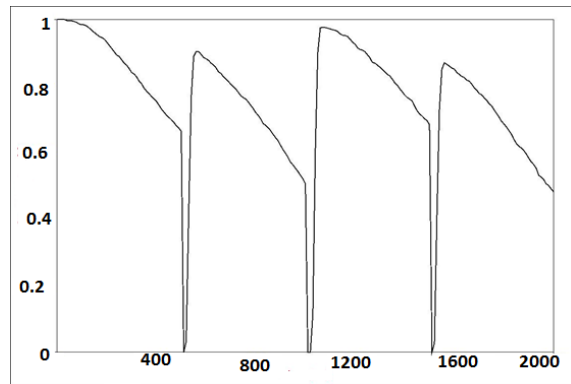
## ۹. جمع‌بندی

در این مقاله، برای موتور مینی‌توربوفن خاص محاسبات قابلیت اطمینان موتور توربوفن در مرحله طراحی انجام شد. طبق الگوریتم پیشنهادشده و لحاظ نمودن داده‌های خرابی، نتایج مربوط به قابلیت اطمینان به‌دست آمده است. بر این اساس، قابلیت اطمینان موتور به زیر ۹۸ درصد در ۱۲۰ ساعت می‌رسد. این مقدار براساس اهداف طراحی کافی نیست و برای بهبود آن و افزایش سطح

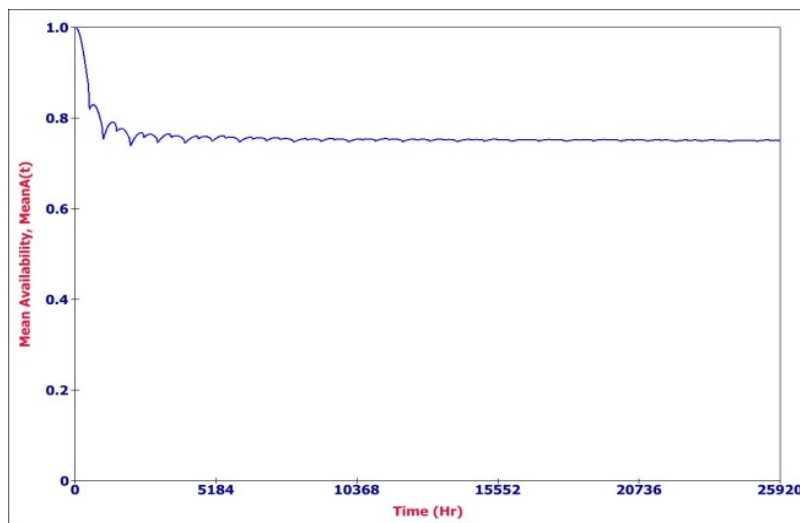
قابلیت اطمینان از روش تخصیص قابلیت اطمینان به ۹۸ درصد در ۲۵۰ ساعت پروازی استفاده شده است. این بخش مقدمه‌ای برای کار بهینه‌سازی در طراحی و بهبود کیفیت موتور تولیدشده است. در ادامه تشخیص قطعات بحرانی در سیستم از نظر خرابی و قابلیت اطمینان صورت گرفته است که طبق آن، فیلترها و پمپ‌های روغن و سوخت و دیسک‌های نواحی چرخان از بحرانی‌ترین اجزای موتور توربوفن مورد نظر می‌باشند. به‌عنوان بخش دیگری از نتایج نمودارهای نرخ خرابی استخراج شده‌اند و منحنی‌های حاصل‌شده حاکی از آن است که سیستم تحت فرسودگی بوده و باید سیاست تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان در طراحی لحاظ شود. همچنین قابلیت دسترسی متوسط سیستم موتور توربوفن در طی مدت سه سال استفاده، برابر با ۰/۷۵۳ درصد برآورد شده و سیاست‌های تعمیرات و نگهداری برای پیشگیری از خرابی‌های بالقوه پیشنهاد شده است.



شکل ۲۳. قابلیت دسترسی در ۱۹۲۰ ساعت انتهایی



شکل ۲۲. قابلیت دسترسی در ۲۰۰۰ ساعت ابتدایی



شکل ۲۴. قابلیت دسترسی متوسط برای سیستم موتور توربوفن در سه سال

جدول ۴. زمان‌های به‌دست آمده برای آماده به‌کار بودن سیستم

لحظه آماده به‌کار شدن	لحظه از کار افتادن	بازه زمانی آماده به‌کار بودن
۲۰۳۷	۲۵۰۰	۴۶۳
۲۴۰۳۸	۲۴۵۰۰	۴۶۲
۲۴۵۳۰	۲۴۷۹۵	۲۶۵
۲۵۰۴۴	۲۵۵۰۰	۴۵۶
۲۵۵۲۲	۲۵۹۲۰	۳۹۸

جدول ۵. نتایج کلی محاسبات قابلیت دسترسی برای موتور توربوفن در مدت ۳ سال

ویژگی‌های عمومی	
متوسط قابلیت دسترسی	۰/۷۵۳
انحراف معیار (متوسط قابلیت دسترسی)	۰/۰۰۱۶
قابلیت دسترسی در ۲۵۹۲۰ ساعت	۰/۹۰۸
قابلیت اطمینان در ۲۵۹۲۰ ساعت	۰
مدت زمان عملیات و از کار افتادگی سیستم	
مدت زمان عملیات (ساعت)	۱۹۸۰۲
کل زمان از کار افتادگی (ساعت)	۱۸۲۹

#### ۱۰. مأخذ

- [1] M. Modarres, M. P. Kaminskiy, V. Krivtsov, *Reliability engineering and risk analysis: a practical guide*, Second edition, CRC press, 2009.
- [2] A. El-Sayed, *Aircraft propulsion and gas turbine engines*, CRC Press, 2008.
- [3] G. C. Avontuur, K. van der Werff, 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] B. M. O. Halloran, C. Hoyle, R. B. Stone, I. Y. Tumer, The early design reliability prediction method, *Proceedings of The international mechanical engineering congress and exposition*, pp. 1765-1776, 2012.
- [5] A. N. Patowary, J. Hazarika, G. L. Sriwastav, Estimation of reliability in interference models using Monte Carlo simulation, *Reliability: Theory and Applications*, Vol. 1, pp. 78-84, 2012.
- [6] A. Mettas, Reliability allocation and optimization for complex systems, *Proceedings of The Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 216-221, 2000.
- [7] G. R. Weckman, R. L. Shell, J. H. Marvel, Modeling the reliability of repairable systems in the aviation industry, *Computers & industrial engineering*, Vol. 40, No. 1-2, pp. 51-63, 2001.
- [8] R. K. Moghadas, M. J. Fadaee, 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] Northrop unveils next generation Global Hawk, aerotech news and review, 2006; [https://en.wikipedia.org/wiki/Northrop\\_Grumman\\_RQ-4\\_Global\\_Hawk](https://en.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_RQ-4_Global_Hawk).
- [10] J. Mattingly, H. Von Ohain, *Elements of propulsion: gas turbines and rockets*, AIAA education series, Second edition, 2006.
- [11] A. Onvani, *Gas Turbines (Industrial-Aircraft)*, Arkan Press, Edition 2, 2010 (in Persian فارسی).
- [12] W. R. Blischke, D. N. Prabhakar Murthy, *Case Studies in Reliability and Maintenance*, Vol. 480, John Wiley & Sons, Hoboken, 2003.
- [13] D. P. Kroese, T. Taimre, Z. I. Botev, *Handbook of Monte Carlo methods*. Vol. 706, John Wiley & Sons, 2011.

- [14] M. Modarres, *Risk analysis in engineering: techniques, tools, and trends*, CRC press, 2006.
- [15] A. N. O'Connor, *Probability distributions used in reliability engineering*. RIAC, 2011.
- [16] A. C. Márquez, *The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenanc*, Springer, 2007.
- [17] L. Leemis, *Reliability: probabilistic models and statistical methods*, Prentice-Hall, Inc., 1995.
- [18] Y. K. Malaiya, Reliability allocation, *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, John Wiley & Sons, 2008.
- [19] O. P. Yadav, N. Singh, P. S. Goel, Reliability demonstration test planning: A three dimensional consideration, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, No. 8, pp. 882-893, 2006.
- [20] OREDA Participants, *Offshore reliability data handbook*, 4<sup>th</sup> ed., Norway, Trondheim, 2002.
- [21] Handbook Military. *Reliability Prediction of Electronic Equipment*, MILHDBK-217F, Department of Defense, Washington, 1991.
- [22] Center, Naval Surface Warfare. *Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment*. Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, 1998.
- [23] Handbook Military. *Reliability modeling and Prediction*, MILHDBK-756b, Department of Defense, Washington, 1981.
- [24] Maintenance Report of Civil Aviation Organization of Islamic Republic of Iran, 2013.

## پی‌نوشت

1. deterministic
2. Mantis
3. RQ-11B
4. Phantom Ray
5. Rolls-Royce

۶. نورثروپ گرومن آر. کیو. ۴ گلوبال هاوک (RQ-4 global Hawk) پهپاد ساخت شرکت نورثروپ گرومن است که توسط نیروی هوایی و نیروی دریایی ایالات متحده به‌عنوان یک هواپیمای شناسایی به‌کار می‌رود. این پهپاد به نام گلوبال هاوک نیز شناخته می‌شود. این نامگذاری از سوی گروه نگهداری این پهپاد به سبب زمان درازی که در روی زمین بابت نگهداری از آن صرف می‌شود انجام شده است. این مدل می‌تواند تا ارتفاع ۶۵ هزار پا پرواز کند و کنترل آن برعهده چهار خدمه است [ویراستار].

7. Ivchenko
8. Monte Carlo Simulation
9. Bathtub Curve
10. Hazard function
11. aeronautical radio incorporated
12. A320
13. Fokker 100
14. mean time between failure
15. preventive maintenance
16. inactive
17. Active