هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

# تحلیل قابلیت اطمینان پره فن موتور توربوفن با استفاده از روش قابلیت اطمینان مرتبه اول

**پیمان غلامی[۱]، محمدجواد قاسمی پاریزی[۲]، علیرضا نوایی[۳] و حسین پورفرزانه[۴]**

**۱- شرکت مهندسی و ساخت موتور و تجهیزات هوایی ایرانیان، کرج، ایران، Gholami.Peyman@Mapnaaero.com**
**۲- شرکت مهندسی و ساخت موتور و تجهیزات هوایی ایرانیان، کرج، ایران، Ghasemi.Mohammad2@Mapnaaero.com**
**۳- شرکت مهندسی و ساخت موتور و تجهیزات هوایی ایرانیان، کرج، ایران، Navaei.Alireza@Mapnaaero.com**
**۴- شرکت مهندسی و ساخت موتور و تجهیزات هوایی ایرانیان، کرج، ایران، Pourfarzaneh.Hossein@Mapnaaero.com**

**چکیده**

امروزه ارتقای سیستم ایمنی وسایل پرنده نظیر هواپیما به منظور کاهش سوانح هوایی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این حین سیستم پیشرانش که مسئولیت جلوبرندگی هواپیما را برعهده دارد، با توجه به پیچیدگی در زمره سیستم‌های حساس هواپیما به شمار می‌رود. ازین رو محاسبات قابلیت اطمینان که به توانایی یک سیستم برای انجام صحیح مأموریت مشخص در شرایط و دوره زمانی مشخص بیان می‌شود مورد توجه قرار گرفته‌است. با استفاده از این محاسبات، شناخت کلی نسبت به رفتار خرابی از منظر ایمنی حاصل خواهد شد. بنابراین شناخت مکانیزم‌های خرابی، منجر به پیش‌گیری از خرابی‌ها، درک چرایی و چگونگی وقوع شکست می‌شود که این شناخت مستلزم آگاهی از فیزیک خرابی است که در این محاسبات بدست می‌آید. موضوع اطمینان از عملکرد سیستم پیشرانش خواسته اصلی تولید کنندگان هواپیما و خطوط هوایی است و مهمترین شاخص‌های انتخاب و خرید توسط مشتریان به منظور حفظ کیفیت و عملکرد در سطح بهینه می‌باشد. لذا ارزیابی قابلیت اطمینان نقش مهمی در ارزیابی عملکرد این سیستم خواهد داشت. با توجه به اینکه کارکرد هر سیستمی به کارکرد تک تک اجزای آن بستگی دارد و افزایش قابلیت اطمینان یک زیرسیستم موجب افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم می‌شود، لذادر این تحقیق محاسبات قابلیت اطمینان پره فن موتور توربوفن تحت مکانیزم خستگی با استفاده از نرم‌افزار NESSUS انجام و آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مهم طراحی صورت گرفته‌است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد محاسبات این شاخص‌ها برای تغییر و اصلاح در طراحی و ساخت به منظور تولید محصول با کیفیت‌تر و افزایش اطمینان مشتری از سیستم خریداری شده ضروری می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** قابلیت اطمینان، مکانیزم خرابی، پره فن، موتور توربوفن، خستگی، نرم‌افزار NESSUS

## مقدمه

در میان سامانه‌های مهندسی هیچ سیستمی وجود ندارد که اجزاء و ساختار آن به لحاظ طراحی و ساخت به طور صد در صد سالم و بدون نقص کار کند. به این دلیل است که همواره محدودیت‌هایی در فرایند مهندسی وجود دارد که طراحی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین طراحی بدون نقص، امکان‌پذیر نبوده و به لحاظ اقتصادی نشدنی است. در سیستم‌های مهندسی برای به حداقل رساندن تعداد شکست‌ها و احتمال وقوع آن‌ها، طراح باید آگاهی کافی از مکانیزم شکست داشته باشد تا بتواند طراحی مناسب بر اساس محدودیت‌ها و نیازهای فنی ارائه کند.

موضوع اطمینان از عملکرد یک محصول یا مجموعه دغدغه ذهنی طراحان، سازندگان و استفاده‌کنندگان از آن محصول می‌باشد. بنابراین برای رسیدگی به چالش‌های ریسک و قابلیت اطمینان در طراحی، ساخت و بهره‌برداری، مهندسی قابلیت اطمینان در طول چند دهه گذشته تغییرات زیادی را تجربه کرده‌است. باتوجه به این‌که روش‌های قابلیت اطمینان با در نظرگرفتن داده و اطلاعات واقعی و مدل‌سازی پدیده‌های شکست، قابل استناد خواهد شد، تحولی شگرف در محاسبات قابلیت

اطمینان از منظر نرخ‌های خرابی ثابت[۱] به توزیع عمر (همانند توزیع وایبل و نرمال لگاریتمی) نمایان‌گر اولین گام در جهت بهبود مدل‌سازی رفتار مکانیزم شکست و فرسودگی در سازه‌ها، سیستم‌ها و اجزای سازنده ایجاد شده است. این روند با استفاده از اصول فیزیکی و مکانیکی، همانند قوانین ترمودینامیکی توسعه داده شده است.

رویکرد فیزیک شکست در مقایسه با رویکرد آماری که بر اطلاعات تاریخی متکی است، یک روش مبتنی بر علم مهندسی برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان و همچنین مدیریت سلامت است که از مدل‌سازی و شبیه‌سازی مبتنی بر فیزیک خرابی برای ارزیابی طراحی و قابلیت اطمینان استفاده می‌کند [۱]. این روش می‌تواند برای ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد سیستم در ارزیابی قابلیت اطمینان با استفاده از مدل‌سازی مکانیزم‌های خرابی مانند خستگی، شکست، سایش و خوردگی مورد استفاده قرار گیرد. رویکرد فیزیک خرابی یک نمایش جامع است و می‌تواند عوامل فیزیکی مرتبط را در مدل‌های ارزیابی عمر و مدل‌های قابلیت اطمینان ساختارها، اجزای سازنده و سیستم‌های مدرن به ارمغان بیاورد.

با توجه به اینکه توسعه مدل‌های فیزیک شکست بر اساس اطلاعات محدود است، عدم اطمینان مربوط به این محدودیت منجر به رویکرد شکست فیزیک احتمالی می‌شود که به طور رسمی به عدم‌قطعیت در مورد مدل‌های فیزیک خرابی و خروجی‌های آن‌ها اشاره می‌کند. مطالعات بسیاری در این حوزه انجام شده که آن‌ها را می‌توان به دو دسته کلی روش مبتنی بر مکانیزم خرابی و روش مبتنی بر داده تقسیم نمود که روش مبتنی بر داده نیز به صورت روش‌ها و فرآیندهای تصادفی و یادگیری ماشین انجام می‌شود [۲, ۳]. داده‌های مربوط به گسترش خرابی که در چرخه کاری یک مجموعه ثبت می‌شوند اطلاعات ارزشمندی را در مورد رفتار و خرابی محصول برای ارزیابی قابلیت اطمینان و سایر تصمیمات مهندسی و مدیریتی ارائه می‌دهند. ویژگی‌های داده‌های تخریب و روش‌های مورد استفاده برای جمع‌آوری داده‌ها در انتخاب مدل‌های تخریب نقش مهمی دارند. به طور کلی، چنین اطلاعاتی از تست‌های آزمایشگاهی، کاربردهای میدانی و یا داده‌های نظارت بر شرایط واقعی در شرایط معمولی یا در شرایط تنش شتاب گرفته شده حاصل می‌شود. این داده‌ها می‌تواند اندازه‌گیری مستقیم فرآیندهای تخریب (به عنوان مثال، رشد ترک) و یا اندازه‌گیری‌های دیگر ویژگی‌های قطعه که با روند تخریب محصول مرتبط است (مانند ارتعاش، تغییر ولتاژ خروجی، درجه حرارت) باشد. در سال‌های اخیر، تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر فرآیند تخریب، برای دست‌یابی به شناخت بهتر از محصول و کاهش زمان توسعه محصول افزایش یافته است و فرآیندهای مثل وینر به عنوان یکی از روش‌های مدل‌سازی فرآیندهای تصادفی همواره مورد توجه محققین بوده است. در این فرایند تصادفی، میزان افزایش یا طول گام‌ها براساس توزیع نرمال تعیین می‌شود و میانگین این توزیع برابر با صفر و واریانس آن نیز در همه گام‌ها ثابت است.

به طور کلی، برای استفاده از تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان ساختاری، باید چهار مرحله دنبال شود [۴]؛ (۱) تعریف مدل خرابی[۲] (۲) تعریف مدل طراحی[۳] (۳) تعریف مدل برآورد قابلیت اطمینان[۴] (۴) برآورد احتمال شکست[۵] در مرحله اول، حالت خرابی مشخص می‌شود، یعنی فرآیندهای مختلف خرابی سازه مشخص و متغیرهای اساسی و معیارهای خرابی تعیین می‌شوند. در مرحله دوم ساختار با استفاده از رویکرد قطعی توصیف‌شده و پارامترهای طراحی به همراه توابع طراحی در مدل گنجانیده شده‌اند. در مدل قابلیت اطمینان، مرز بین ناحیه خرابی و ناحیه ایمن مشخص و توابع حالت حدی بر اساس مسئله قطعی و توزیع آماری متغیرهای اساسی مسئله تعیین می‌شود. براین اساس، یک روش احتمالی برای برآورد قابلیت اطمینان ساختاری انتخاب شده است [۵].

در مدل‌سازی فیزیک شکست ابتدا از بررسی خستگی و شکست مواد استفاده شده است. قابلیت اطمینان مربوط به خستگی و شکست مواد، پیشرفت چشمگیری در دهه ۱۹۵۰ و اوایل دهه ۱۹۶۰ داشت. در سال ۱۹۵۷، جرج ایروین ثابت کرد که شکست مواد به علت تغییر شکل پلاستیک در نوک ترک است و تئوری گریفیث تعمیم‌یافته[۶] [۶] رابطه بین تنش اسمی اعمال شده و طول ترک در شکست را توصیف کرد. وایبل بین سال‌های ۱۹۵۵ و ۱۹۶۳ چندین نشریه مربوط به مدل‌سازی مکانیزم خستگی و خزش را منتشر کرد [۷]. در سال ۱۹۶۱، وایبل یک کتاب در مورد مواد و آزمایش خستگی در حالی که به عنوان مشاور برای آزمایشگاه مواد نیروی هوایی ایالات متحده[۷] کار می‌کرد، منتشر کرد [۸]. بر اساس کار اروین بر روی ضریب شدت تنش، پاریس و همکاران [۹] روش‌هایی را برای پیش‌بینی نرخ رشد ترک خستگی معرفی کردند.

رویکرد فیزیک شکست در قابلیت اطمینان، استفاده از دانش علمی مربوط به آسیب و فرآیندهای تخریب و مشخصات بارگذاری برای یک نمونه، ساختار آن، خواص مواد و شرایط محیطی است تا مکانیزم‌های پتانسیل شکست را که به صورت جداگانه یا ترکیبی منجر به شکست نمونه می‌شود، شناسایی می‌کند. سپس از مدل‌های فیزیک شکست

[۱] Constant hazard rates

[۲] Definition of failure model

[۳] Definition of design model

[۴] Definition of structural reliability estimation model

[۵] Estimation of failure probability

[۶] Generalized Griffith's Theory

[۷] U.S. Air Force Materials Laboratory

برای ارزیابی قابلیت اطمینان، عمر صرف‌شده و عمر باقی‌مانده استفاده می‌شود.

مهم‌ترین قدم در رویکرد فیزیک شکست، شناخت سازوکارهای شکست است (مانند خوردگی و خستگی) تا به طور مناسب تخریب و زمان وقوع شکست مدل شود. در این رویکرد، تلاش می‌شود تا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اساسی مواد به معیارهای قابلیت اطمینان (مانند تخریب، عمر یا چرخه تا شکست) مرتبط شود [۱۰]. برای از بین بردن (یا کاهش) وقوع خرابی‌ها، باید ریشه‌های آن‌ها را از بین برد (یا کاهش یابد). برای انجام این کار، باید فیزیک مواد و سازوکار شکست درک شود. گاهی اوقات ساختن چند نمونه اولیه یکسان برای آزمایش قابلیت اطمینان غیرممکن است. بسیاری از این موارد در این زمینه شامل سیستم‌های مقیاس بزرگ (مانند ساختمان‌ها و وسایل نقلیه فضایی)، سیستم‌های بسیار گران و نمونه‌هایی است که باید در اولین بار به درستی کار کنند. در این موارد داده‌های عملکردی و میدانی در دسترس نیستند و رویکرد فیزیک شکست به منظور تخریب و ارزیابی عمر مناسب‌تر است. به همین ترتیب، رویکرد فیزیک شکست در مرحله طراحی هنگامی که نمونه اولیه یا امکانات آزمایشی محدود است، بسیار مفید می‌باشد. در نهایت، رویکرد فیزیک در هنگام برخورد با نمونه‌های با قابل اطمینان بالا، زمانی که داده‌های خرابی بسیار کمی برای تجزیه و تحلیل وجود دارد، مفید است.

در این تحقیق محاسبات قابلیت اطمینان پره فن موتور توربوفن تحت مکانیزم خستگی با استفاده از نرم‌افزار NESSUS [۱۱] انجام و آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مهم طراحی صورت گرفته‌است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد محاسبات این شاخص‌ها برای تغییر و اصلاح در طراحی و ساخت به منظور تولید محصول با کیفیت‌تر و افزایش اطمینان مشتری از سیستم خریداری شده ضروری می‌باشد.

## تحلیل قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان یک سازه بیانگر احتمال موفقیت یک سازه در تحمل بار اعمالی در شرایط کاری معین و طی مدت زمان مورد نظر است. بنابراین مشخصه‌ای است مبتنی بر قواعد احتمالاتی، فیزیک خرابی، شرایط بارگذاری و زمان. با توجه به پیچیدگی هر یک از موارد مذکور، روش‌های متعددی در تحلیل و ارزیابی قابلیت اطمینان می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱۲].

روش قابلیت اطمینان مرتبه اول[۱] به طور گسترده در برنامه‌های تخمین قابلیت اطمینان سازه‌ها استفاده شده است. این روش شامل بسط تیلور تابع خرابی است، یعنی خطی‌سازی معادله حالت حدی حول مقدار میانگین تابع انجام نمی‌شود، بلکه در نقطه‌ای است که "محتمل‌ترین نقطه شکست[۲]" نامیده می‌شود. انتخاب یک نقطه خطی‌سازی مناسب یک نکته مهم است و در واقع به یک روش حل تکراری منجر می‌شود.

فرآیند در این روش با تبدیل متغیرهای غیرنرمال به متغیرهای نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس واحد با استفاده از تبدیل روزنبلات آغاز می‌شود. هدف این است که محتمل‌ترین نقطه شکست پیدا شود، یعنی نقطه‌ای در محل خرابی که حداقل فاصله از سطح تابع حد تا مبدأ را در فضای متغیرهای کاهش‌یافته تعریف می‌کند. کمترین فاصله بین سطح خرابی و مبدأ در فضای متغیرهای کاهش‌یافته، شاخص قابلیت اطمینان ($\beta$) گفته می‌شود. با توجه به اینکه اکنون $\beta$ در دسترس است، احتمال خرابی سیستم را می‌توان با استفاده از رابطه زیر تقریب زد [۱۳]:

$$P_f = \Phi(-\beta) \qquad (۱)$$

که $\Phi$ تابع توزیع تجمعی برای یک متغیر نرمال استاندارد است.

## تعریف مسئله

در این مطالعه یک پره فن موتور توربوفن با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل شده است. مدل و نحوه مش‌بندی پره فن در **شکل ۱** نشان داده شده است. مشخصات وزن و تراست این موتور توربوفن در

**جدول ۱** آورده شده است. طبق تئوری قابلیت اطمینان ساختاری، در ابتدا می‌باستی یک تابع خرابی برای پره فن تعریف کرد. برای این کار از عمر خستگی محاسبه شده توسط معادله پاریس[۳] استفاده می‌شود. طبق معادله پاریس، عمر خستگی یک سازه به صورت معادله (۲) محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$\text{Life} = \frac{2\left(a_f^{1-n/2} - a_i^{1-n/2}\right)}{A(n-2)(\alpha\sigma_{max}\sqrt{n})^n} \qquad (۲)$$

که $a_i$ طول ترک اولیه، $a_f$ طول ترک نهایی، $A = 6.33 \times 10^{-11}$، $n = 2.5$، $\alpha = 1$ است. $\sigma_{max}$ مقدار تنش به وجود آمده در پره فن در اثر بارگذاری است که براساس تحلیل آباکوس به‌دست می‌آید. بنابراین $\sigma_{max}$ برابر است است با:

$$\sigma_{max} = fe(\rho, E, \nu) \qquad (۳)$$

معادله (۳) بیان می‌کند که مقدار تنش تابعی از چگالی ($\rho$)، مدول الاستیسیته ($E$) و نسبت پواسون ($\nu$) است که به عنوان متغیرهای تصادفی درنظر گرفته می‌شوند. علاوه بر موارد مذکور فرض می‌شود که دو پارامتر طول ترک اولیه

[۱] First order reliability method (FORM)

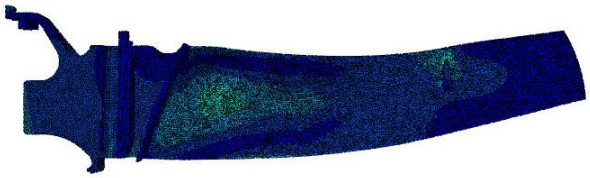
[۲] Most probable failure points

[۳] Paris equation

و ترک نهایی نیز متغیر تصادفی می‌باشند. بنابراین خواص آماری این متغیرهای تصادفی در **جدول ۲** آورده شده است.

**جدول ۱:** مشخصات موتور توربوفن [۱۵]

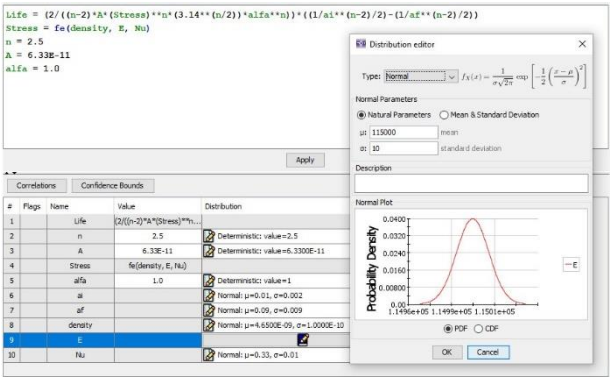
| متغیر تصادفی | مقدار |
|---|---|
| وزن ($N$) | ۲۶۱۳۴ |
| تراست ($N$) | ۱۵۱۲۴۰ |



**شکل ۱:** پره فن

**جدول ۲:** خوص احتمالاتی متغیرهای تصادفی

| متغیر تصادفی | میانگین | انحراف معیار | توزیع |
|---|---|---|---|
| ترک اولیه (mm) | ۰/۰۱ | ۰/۰۰۲ | نرمال |
| ترک نهایی (mm) | ۰/۰۹ | ۰/۰۰۹ | نرمال |
| چگالی ($Tone/mm^3$) | $۴/۶۵ \times ۱۰^{-۹}$ | $۱ \times ۱۰^{-۱۰}$ | نرمال |
| الاستیسیته ($N/mm^2$) | $۱/۱۵ \times ۱۰^{۵}$ | ۱۰ | نرمال |
| نسبت پواسون | ۰/۳۳ | ۰/۰۱ | نرمال |

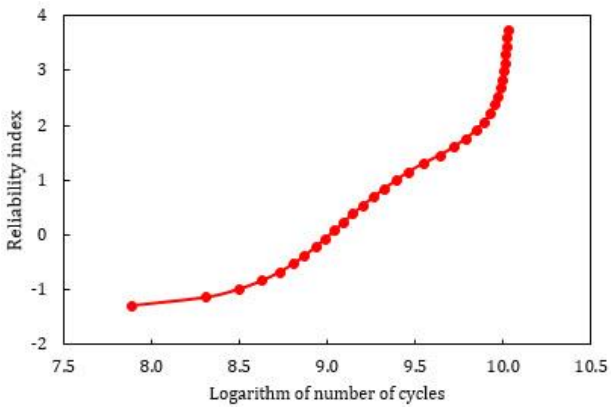



**شکل ۲:** نرم‌افزار NESSUS

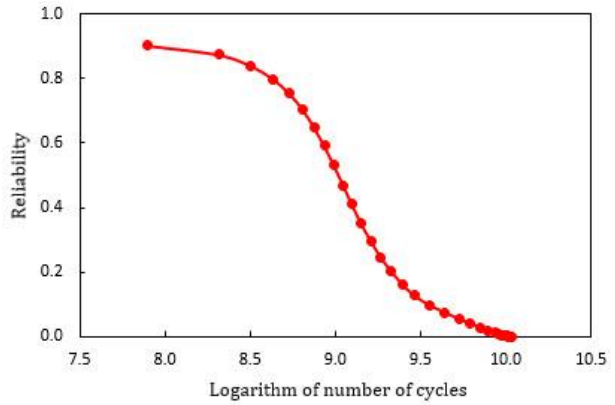
موارد گفته شده اعم از تابع خرابی، تعریف متغیرهای تصادفی، مشخص کردن المان با بیشترین تنش و ... در نرم‌افزار NESSUS انجام می‌شود (**شکل ۲**).

## نتایج

قابلیت اطمینان پره فن موتور توربوفن با استفاده از روش مرتبه اول قابلیت اطمینان و تابع خرابی که با استفاده از معادله پاریس به دست امده است، محاسبه شده است. در ابتدا تغیرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به سیکل بارگذاری (شکل ۳) و در ادامه تغییرات قابلیت اطمینان نسبت به سیکل بارگذاری به دست آمده که در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است تا قبل از $۷/۸۲ \times ۱۰^{۷}$ سیکل، قابلیت اطمینان پره ۰/۹۰۲۲۹۸ هست و بعد از آن مقدار قابلیت اطمینان با شیب زیادی نسبت به سیکل بارگذاری افزایش پیدا می‌کند.




شکل ۳: تغییرات شاخص قابلیت اطمینان به ازای عمر

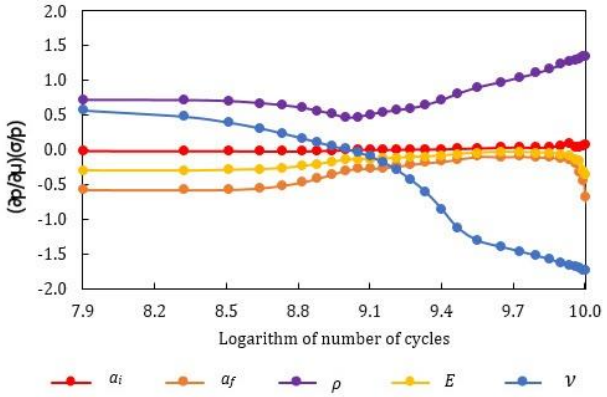



شکل ۴: تغییرات قابلیت اطمینان به ازای عمر

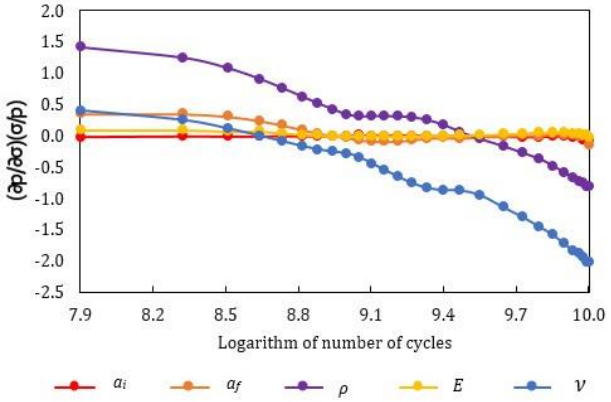
شکل ۵ ضریب حساسیت احتمالی را با توجه به تغییر در میانگین و انحراف معیار برای هر متغیر تصادفی در سیستم نشان می دهد. محور X مقادیر مختلف سیکل‌های بارگذاری برحسب لگاریتمی نشان می‌دهد. محور y نشان‌دهنده ضریب حساسیت نسبت به میانگین و انحراف معیار است. نمودارها نشان می‌دهند که در یک مقدار خاص سیکل بارگذاری چه ضریب حساسیتی برای هر متغیر تصادفی به دست می‌آید. اگر ضریب هر متغیر تصادفی مثبت باشد، با افزایش میانگین یا انحراف معیار آن متغیر تصادفی بدون تغییر میانگین و انحراف معیار سایر متغیرهای تصادفی، احتمال خرابی افزایش می‌یابد. زمانی که ضریب حساسیت منفی باشد، سناریو معکوس می‌شود.

شکل ۶ ترکیبی از شکل ۵ (الف) و (ب) است و سطوح حساسیت تابع پاسخ را برای یک مقدار خاص از سیکل بارگذاری برای میانگین و انحراف استاندارد نشان می دهد. شکل ۵ (الف) و (ب) حساسیت متغیرهای

تصادفی را در مقادیر مختلف سیکل بارگذاری نشان می دهد در حالی که شکل ۶ حساسیت متغیرهای تصادفی را در رویداد خرابی مورد علاقه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ می‌توان گفت که پارامترهای

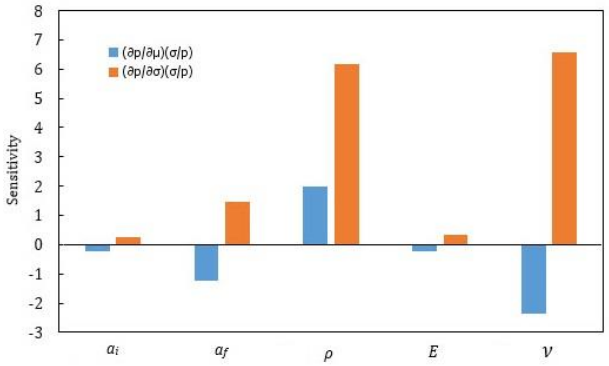



(الف)




(ب)

**شکل ۵:** عوامل حساسیت احتمالی با توجه به تغییر (الف) مقادیر میانگین و (ب) مقادیر انحراف استاندارد هر متغیر تصادفی ورودی




**شکل ۶:** ضرایب حساسیت احتمالی هر متغیر تصادفی ورودی در یک سطح خاص

چگالی و نسبت پواسن که از خواص مواد هستند دارای بیشترین حساسیت هستند.

## نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه با ترکیب دو روش قابلیت اطمینان و تحلیل المان محدود، قابلیت اطمینان پره فن موتور توربوفن محاسبه شده است. پره فن ابتدا در نرم‌افزار اباکوس تحلیل استاتیکی شده است و سپس با استفاده از نرم‌افزار NESSUS و معادله رشد ترک پاریس احتمال خرابی پره محاسبه شده است. برای محاسبه احتمال خرابی در این تحلیل از روش مرتبه اول قابلیت اطمینان استفاده شده است. در انتها تحلیل حساست بروی بعضی از پارامترهای مهم صورت گرفته است و تغییرات قابلیت اطمینان برحسب آن‌ها به‌دست آمده است. نشان داده شده است که قابلیت اطمینان پره فن موتور توربوفن تا $۱۰^{۷}$ سیکل بارگذاری ۰/۹۰۲۲ می‌باشد و بعد از آن مقدار قابلیت اطمینان به شدت کاهش می‌یابد. همچنین از بین متغیرهای تصادفی ورودی پارامترهای خواص مواد مانند چگالی و نسبت پواسن دارای بیشترین اثر بر روی قابلیت اطمینان است.

## مراجع

[۱] J. McPherson, "Reliability physics and engineering: time-to-failure modeling: Springer Science & Business Media," 2013.

[۲] X.-S. Si, W. Wang, C.-H. Hu, and D.-H. Zhou, "Remaining useful life estimation–a review on the statistical data driven approaches," *European Journal of Operational Research*, vol. 213, pp. 1-14, 2011.

[۳] Z. Zhang, X. Si, C. Hu, and X. Kong, "Degradation modeling–based remaining useful life estimation: A review on approaches for systems with heterogeneity," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 229, pp. 343-355, 2015.

[۴] P. Brøndsted and R. P. Nijssen, "Advances in wind turbine blade design and materials," 2013.

[۵] M. Nadjafi and P. Gholami, "Probability fatigue life prediction of pin-loaded laminated composites by continuum damage mechanics-based Monte Carlo simulation," *Composites Communications*, vol. 32, p. 101161, 2022.

[۶] G. R. Irwin, "Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate," *Trans. ASME, Ser. E, J. Appl. Mech.*, vol. 24, pp. 361-364, 1957.

[۷] W. Weibull, "Statistical evaluation of data from fatigue and creep-rupture test I. Fundemental concepts and general mhetods.," 1959.

[۸] W. Weibull, *Fatigue testing and analysis of results*: Elsevier, 2013.

[۹] P. C. Paris, "A rational analytic theory of fatigue," *The trend in engineering*, vol. 13, p. 9, 1961.

[۱۰] M. Modarres, M. Amiri, and C. Jackson, *Probabilistic physics of failure approach to reliability: modeling, accelerated testing, prognosis and reliability assessment*: John Wiley & Sons, 2017.

[۱۱] D. Riha, B. Thacker, S. Fitch, and M. Enright, "Recent advances of the NESSUS probabilistic analysis software for engineering applications," in *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2002, p. 1268.

[۱۲] M. Nadjafi and P. Gholami, "Reliability Study of Notched Composite Laminates Under Uniaxial Loading Based on Continuum Damage Mechanics Approach," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, pp. 1-15, 2021.

[۱۳] M. Lemaire, *Structural reliability*: John Wiley & Sons, 2013.

[۱٤] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, and H. O. Fuchs, *Metal fatigue in engineering*: John Wiley & Sons, 2000.

[۱٥] Initial Data for CFM56 Engine Family Test Facility Project, 2018.