International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2016)
September 2016, Volume 27, Number 3
pp. 373-402

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

Evaluation and Improving Reliability of Helicopter Landing Gear in an Aircraft Manufacturing Company

Mohammad Farahmand, Mahdi Karbasian* & Arash Shahin

Mohammad Farahmand, *Department of Industrial Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran*
Mahdi Karbasian, *Associated Professor, Department of Industrial Engineering, Malek Ashtar, University Of Technology, Shahinshahr, Iran*
Arash Shahin, *Department of Management, University of Isfahan, Isfahan, Iran*

Keywords

Failure modes and effects analysis (FMEA),

Fault tree analysis (FTA),

Feasibility of objectives (FOO),

Reliability

ABSTRACT

Due to its sensitivity to time and accuracy, aerospace equipment requires a highly accurate manufacturing process to achieve higher reliability compared to other equipment. Focusing the studied helicopter, this study examines reliability of components of a landing gear manufactured by an aircraft company to improve total reliability of the product. Developing a model for risk-based design of a landing gear, this study proposes an inclusive approach for evaluating and promoting total reliability of the landing gear. Obviously, the reliability of components leads to the total reliability of product. This study identifies different components of a product to examine reliability of a component of that product. Then, the components are prioritized by FMEA for promotion to increase total reliability of the product. In conclusion, the objective of this study is to develop an inclusive model for improving reliability of mechanical components of landing gear manufactured by an aircraft company.

© 2016 IUST Publication, IJIEPM Vol. 27, No. 3, All Rights Reserved

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۳، جلـــد ۲۷، پاییز ۱۳۹۵
صفحـــه ۴۰۲-۳۷۴

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

ارزیابی و بهبود قابلیت اطمینان آرابه فرود بالگرد در یک شرکت هواپیماسازی ایران

محمد فرهمند، مهدی کرباسیان* و آرش شاهین

کلمات کلیدی

قابلیت اطمینان،
روش فو،
تحلیل درخت خطا،
تحلیل حالات بالقوه خرابی،
آثار شکست،
آرابه فرود بالگرد

چکیده:

تجهیزات هوایی به دلیل حساس بودن در انجام مأموریت از لحاظ زمان و دقت مورد نظر، نیازمند فرآیند تولید دقیق‌تری در راستای نیل به قابلیت‌اطمینان بالا نسبت به سایر تجهیزات است. لذا در این پژوهش با تمرکز بر روی بالگرد مورد مطالعه به بررسی قابلیت‌اطمینان قطعات اصلی آرابه فرود آن به منظور ارتقای سطح قابلیت‌اطمینان کل محصول پرداخته شده است. و در طی آن با هدف ارائه الگوریتمی جامع و یکپارچه به منظور بهبود قابلیت‌اطمینان محصولات انجام گرفته است. بدین منظور، قبل از هر چیز به شناسایی عوامل مؤثر در طراحی احتمالی محصولات پرداخته شد. و سپس به مطالعه آرابه فرود بالگرد با شناسایی ابزارهای مناسب به منظور بررسی محصول از لحاظ کارکرد و نحوهٔ اتصالات و ترکیب ساختاری سیستم آرابه فرود بالگرد مورد مطالعه پرداخته شد. در ادامه، نظر به ثابت بودن نرخ شکست در طول عمر قطعات مکانیکی؛ محاسبات پیش‌بینی قابلیت‌اطمینان با در نظر گرفتن ثابت بودن نرخ خرابی آن‌ها با تابع توزیع نمایی انجام گرفت و نیز با قابلیت‌اطمینان تخصیص داده شده توسط روش **FOO**، مقایسه شد. در نتیجه با مشخص شدن قطعات بحرانی، به تشخیص دقیق کلیهٔ آثار عدم رسیدن قابلیت‌اطمینان سیستم آرابه فرود به حد استاندارد تعریف شده توسط ابزار تحلیل درخت خطا پرداخته شد. خروجی‌های برگرفته از این ابزار را به ورودی‌های ابزار **FMEA** سپرده تا به علل آثار به وجود آمده پی برده شود و عدد اولویت ریسک مربوط به هر یک از خطاها مشخص گردید. و در مرحله دوم تجزیه و تحلیل حالات بالقوه شکست و آثار آن به ارائه پیشنهاداتی جهت کاهش اعداد اولویت ریسک و بهبود قابلیت‌اطمینان محصول پرداخته شد. و در نهایت با طرح آزمایشی به ارائه راهکارهای باصرفه اقتصادی و زمانی به منظور اجرای پیشنهادات تغییر مواد قطعات آلومینیومی به تیتانیوم پرداخته شده است. در مجموع، هدف اصلی این مقاله ارائه الگویی برای بهبود قابلیت‌اطمینان قطعات مکانیکی است و در همین راستا، به ارزیابی و برنامه‌ریزی جهت بهبود قابلیت‌اطمینان بالگرد در شرکت هواپیماسازی ایران با مطالعه موردی آرابه فرود پرداخته است.

۱. مقدمه

در تجهیزات هوایی به دلیل حساس بودن از لحاظ انجام مأموریت مأموریت در زمان و مکان موردنظر (ریزین‌قنی و همکاران[۱]، ۲۰۰۵)، نیازمند فرآیند دقیق‌تری در طراحی قابلیت‌اطمینان نسبت به سایر تجهیزات است (اریکسون[۲]، ۲۰۰۵).

قابلیت‌اطمینان این تجهیزات از طریق آزمایش‌هایی همچون آزمایشات تشدید شونده یا در حین استفاده در مناطق مختلف محاسبه می‌شود و از ابزار FMEA به عنوان راهکاری برای مدیریت ریسک استفاده می‌شود (بِن‌دایا و همکاران[۳]، ۲۰۰۹). امروزه با توجه به درخت خرابی و نمودار مونتاژ محصول (شهانقی، ۱۳۹۰) و نیز با در نظر گرفتن ویژگی‌های عملکردی

تاریخ وصول: ۹۳/۰۶/۰۳
تاریخ تصویب: ۹۳/۱۲/۱۶

محمد فرهمند، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، گروه صنایع، نجف‌آباد، اصفهان، ایران، moh.farahmand@gmail.com
آرش شـــاهین، دانشـــگاه اصـــفهان، گـــروه مـــدیریت، اصـــفهان، ایـــران، arashshahin@hotmail.com
***نویسنده مسئول مقاله: دکتر مهدی کرباسیان**، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی صنایع، شاهین‌شهر، اصفهان، ایران، mkarbasi@mut-es.ac.ir

مورد نظر، قابلیت‌اطمینان قطعات هر قسمت از محصول مشخص می‌شوند (اِستاپلبرگ[۴]، ۲۰۰۹). برای مثال، در یک آرابه فرود بالگرد، قطعه‌ای به نام کراس وجود دارد که تغییر جنس آن با توجه به پارامتر میانگین عمر مفید قطعه، دارای دو حالت است که هر حالت هزینه متفاوتی را به همراه دارد. حال با توجه به بودجه مصوب برای محصول و قابلیت‌اطمینان هدف، انتخاب بهترین جنس کراس از دو جنس موجود، انجام می‌پذیرد.

در این مقاله، ابتدا به تشریح تاریخچه پژوهش پرداخته شده است و بر اساس سوابق تحقیقات انجام شده، روش پژوهش و الگویی جامع و یکپارچه برای بهبود قابلیت‌اطمینان محصولات، تکنیک‌ها و ابزارهای به کار رفته در این پژوهش پرداخته می‌شود. همچنین، تجزیه و تحلیل داده‌ها و مراحل پیش‌بینی و محاسبات قابلیت‌اطمینان بررسی می‌گردد. و در نهایت، با اجرای گام به گام مراحل الگوی ارائه شده روی مورد مطالعه پژوهش، به ثبت نتایج و ارائه پیشنهادهایی در راستای بهبود سطح کیفیت آرابه فرود بالگرد پرداخته شده است.

۲. پیشینه تحقیق:

لیله و همکاران[۵] (۱۹۹۹) در تحقیقی بهبود عملکرد شبکه اطلاعات قابلیت‌اطمینان را در مقابل آسیب‌ناپذیری ارائه دادند. در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که هزینه‌هایی که برای بهبود عملکرد شبکه اطلاعات صرف می‌شوند به مراتب بیشتر از هزینه‌هایی است که برای بهبود قابلیت‌اطمینان اجزاء صرف می‌شود. و در این تحقیق به ارائه یک مدل بهینه چند منظوره فرمول‌بندی شده پرداخته‌اند تا بدین جهت طراحی یک شبکه دارای قابلیت‌اطمینان و امنیت را پیشنهاد نمایند. و از سوی دیگر، شبکه ارتباطات را توسط یک گراف به تصویر کشیدند و ۲ پارامتر قابلیت‌اطمینان و خطر استفاده از شبکه را معرفی کردند و در پایان به این نتیجه رسیدند که این دو مؤلفه مقادیر بسیار متفاوتی از یکدیگر دارند که در طراحی شبکه فقط یکی از این دو مؤلفه را بهینه می‌کنند.

خَرمندا و همکاران[۶] (۲۰۰۲) به بررسی یک سیستم طراحی قابل اطمینان و بهینه به کمک کامپیوتر[۷] پرداخته‌اند که به عنوان یک ابزار کارآمد، بهترین تعادل میان هزینه و ایمنی را تعیین می‌نماید. با استفاده از مفهوم مهندسی همزمان، این سیستم تمامی اطلاعاتی عددی موردنیاز در طول فرآیند طراحی را در اختیار طراح قرار می‌دهد. این سیستم چندین زمینه مانند: بهینه‌سازی چندرشته‌ای، تجزیه و تحلیل قابلیت‌اطمینان، تجزیه و تحلیل عناصر محدود، مدل‌سازی هندسی، تحلیل حساسیت و مهندسی همزمان را یکپارچه نموده است. زمانی که این موارد با یکدیگر تلفیق می‌شوند منجر به مشکلات زیادی نظیر: به وجود آمدن مدل‌های جفت می‌شود که از سوی دیگر، به دلیل حجم محاسبات، زمان محاسبات کامپیوتری نیز افزایش می‌یابد. در این تحقیق محققان به ارائه یک روش جدید هم‌زمان به منظور رسیدن به قابلیت‌اطمینان مورد نظر، با پذیرفتن مدل‌های جفت که در نرم‌افزار مورد نظر خطایی حاصل نگردد و در نهایت، منجر به کاهش زمان محاسبات گردد، پرداخته‌اند. دو مورد ذکر شده (صفحه دوّار و ساختار قلاب) در این تحقیق نشان‌دهندهٔ این است که سیستم طراحی قابل اطمینان و بهینه به کمک کامپیوتر می‌تواند به عنوان یک نرم‌افزار کاربردی مهندسی همزمان برای طراحان استفاده شود.

ماهادوان و نی[۸] (۲۰۰۳) به دنبال توسعه یک روش تحلیل بازه شکست قابلیت‌اطمینان برای اتصالات نقطه جوش در بدنه اتومبیل تحت سوابق بارهای چند محوری و دامنه تغییرات بوده‌اند. کل طول عمر یک نقطه جوش از دو بخش آغاز و انتشار ترک تشکیل می‌شود. سوابق بارهای چند محوری از تحلیل عناصر محدود یک مدل وسیله نقلیه به دست آمده است. در این تحقیق از قانون احتمالی ماینر[۹] و تلفیق آن با نتایج حاصل از تحلیل تنش و منحنی عمر، به منظور توسعه پیش‌بینی عمر آغاز ترک ناشی از خستگی بهره گرفته شده است. و در این راستا از دو نرم‌افزار[۱۰] مفید و کاربردی جهت ارزیابی قابلیت‌اطمینان برای اتصالات نقطه جوش بدنه اتومبیل در مقابل خستگی و شکست استفاده نموده‌اند.

هدف تورس و همکاران[۱۱] (۲۰۱۰) از ارائه این مقاله مشخص نمودن دلایل موجود منتهی بر شکست قلاب جرثقیل در حین خدمت‌دهی بوده است. در این تحقیق به مواردی نظیر: (۱) خلاصه کردن و تحلیل خصوصیاتی که تولید و نحوه استفاده از آن محصول را براساس استاندارد مشخص می‌نماید، (۲) تحلیل‌های متالوگرافیک[۱۲]، شیمی و فِراکتوگرافیک[۱۳]، (۳) ارزیابی رفتار مکانیکی فلزات از لحاظ مشخصات سختی مواد، استحکام کششی و انرژی شکست قطعه و (۴) شبیه‌سازی سابقه حرارتی قلاب اشاره شده است. نتیجه بازرسی‌های چشمی و میکروسکوپیک حاکی از به وجود آمدن یک فرآیند کُرنش-پیری و تُرد شدن مواد است که ناشی از ترک‌های به وجود آمده در بدنه قلاب در حین جوشکاری بوده است. شایان ذکر است، این ترک‌ها به دلیل فرآیند فعلی جوشکاری غیرقابل کنترل تشخیص داده شده است.

لیو و ماهادوان[۱۴] (۲۰۰۹) در مقاله‌ای به ارائه یک روش جدید برای محاسبه توزیع سایز شکست معادله اولیه[۱۵] پرداخته‌اند. مدل ارائه شده بر اساس دیاگرام کیتاگاوا- تاکاهاشی[۱۶] است. برخلاف استفاده از روش رایج بازگشت به برون‌یابی برای محاسبه سایز شکست معادل اولیه، روش ارائه شده مستقل از سطح بار اعمال

شده و صرفاً از حد خستگی مواد و آستانه شکست خستگی فاکتور شدت تنش استفاده می‌نماید. نکته مثبت سایز شکست معادل اولیه پیشنهاد شده، بسیار کارآمد بودن آن در محاسبات آماری است. آن‌ها در این تحقیق، روش توسعه‌یافته سایز شکست معادل اولیه را با تجزیه و تحلیل رشد ترک به منظور محاسبه احتمال شکست برای تخمین طول عمر خستگی نمونه آزمایشی تلفیق نمودند. و در آخر، نتایج تخمین‌ها را با مشاهدات مختلف مواد فلزی مقایسه کردند.

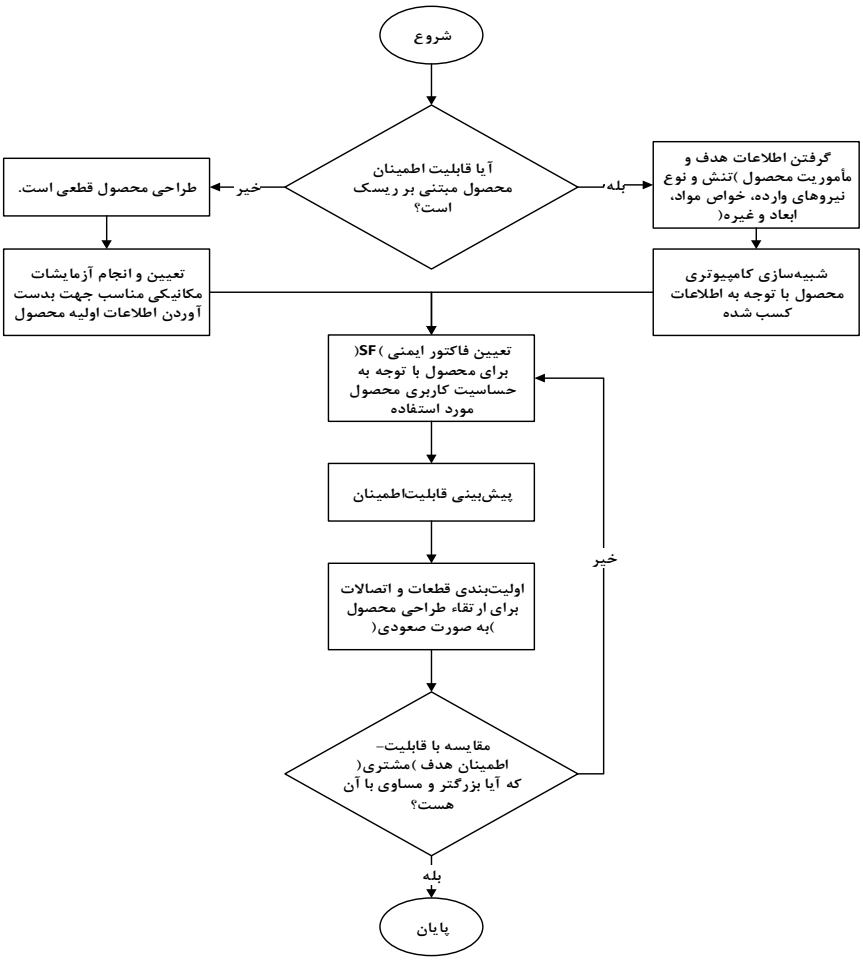
وو و همکاران[۱۷] (۲۰۰۹) در این تحقیق به ارائه یک چهارچوب کلی برای ارزیابی قابلیت‌اطمینان به منظور تخمین توزیع عمر قطعه فلزی به همراه معایب ذاتی آن پرداخته‌اند. و به لطف تلفیق اطلاعات مواد، تجزیه و تحلیل عوامل محدود تنش و مدل مکانیکی شکست، به تخمین توزیع شکست احتمالی مشروط بر بارهای ناشی از خستگی مواد پرداخته‌اند. با توجه به آزمایش انجام شده، توزیع احتمال شکست در محل‌های بحرانی قطعه مشخص و به تصویر کشیده شده است. تمرکز محققان در این تحقیق بیشتر بر روی مدل مکانیکی شکست احتمالی و مدل رشد ترک ناشی از خستگی مواد بوده است.

هو و همکاران (۲۰۱۱) در مقاله‌ای به ارائه مدلی جهت طراحی احتمالی محصول مورد نظر پرداخته‌اند، تا احتمال شکست و منطقه محتمل طراحی بیش از حد استاندارد شده را مشخص نمایند؛ بعلاوه، طراحی‌هایی که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه به شمار می‌آیند از ثمرات توسعه همین تحقیق برای معیّن ساختن اثرات عدم قطعیت است و در نتیجه به عنوان بهبود قابلیت‌اطمینان قطعات به کار برده شده است. با طراحی احتمالی به یک حاشیه در طراحی محصول دست یافته‌اند که این حاشیه در محدوده قابلیت‌اطمینان بوده و در طراحی مجدد منجر به کاهش ۸.۰۳ درصدی وزن پره توربین شده است. با اجرای مهندسی ارزش، یعنی با اجرای یک تغییر در طراحی (ابعاد) محصول به وزن کمتری دست یافته است درحالیکه کارآیی آن نیز بهبود یافته است (استحکام و طول عمر محصول نسبت به قبل تغییری نداشته است)؛ که این خود منجر به کاهش مواد مصرفی در محصول شده و در نهایت باعث کاهش هزینه‌های تولید و حتی کاهش قیمت محصول نیز شود.

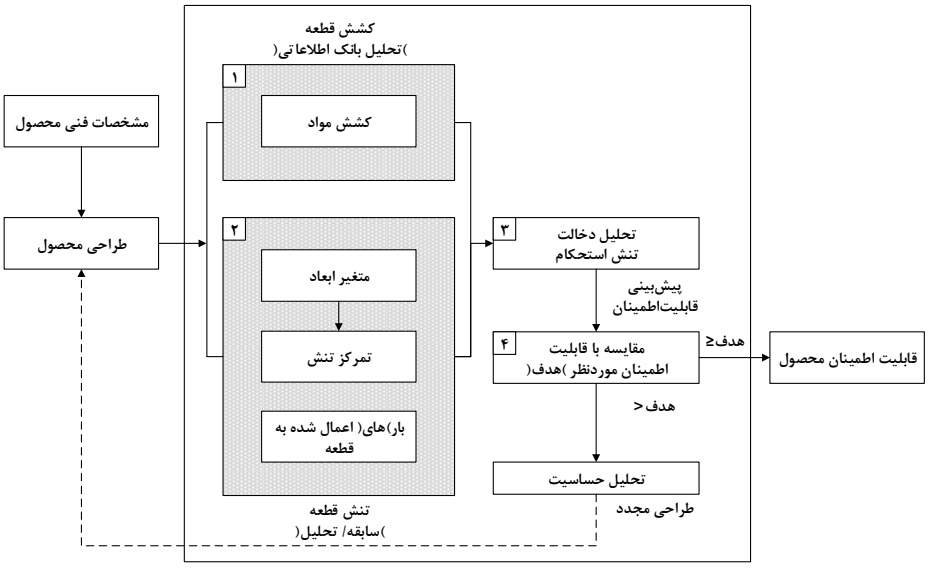
ماریوت و همکاران[۱۸] (۲۰۱۲) به دنبال ارائه یک روش یکپارچه جهت اولویت‌بندی قدم‌های آغازین انجام یک پروژه بر مبنای دو هدف عملکردی مهم است؛ که می‌توان به همان هزینه و کیفیت اشاره نمود. و بخصوص، اهمیت آن برای تولیدکنندگان محصولات کم حجم با قابلیت‌اطمینان بالا[۱۹] (مانند قلاب جرثقیل‌های سنگین) کاملاً مشهود و کاربردی است. نتایج گرفته شده از این تحقیق در طی یک مطالعه موردی حاکی از آن است که روش یکپارچهٔ ارائه شده به عنوان یک متغیر کارآمد جهت شناسایی، انتخاب و قضاوت بر بهبود اولویت‌بندی این گونه از محصولات معرفی شده است.

دانگ و همکاران[۲۰] (۲۰۱۲) در این تحقیق به پیش‌بینی قابلیت‌اطمینان خستگی جوش اتصالات لوله‌ای چندسطحی اسکلهٔ توربین‌های بادی که مأموریت این اتصالات در عمق ۷۰ متری زیر آب و در شمالی‌ترین منطقه دریای شمال واقع است، پرداخته‌اند. بدین منظور از یک سو، برای هرچه بهتر فرض نمودن شرایط عملیاتی محیط (باد و دریا) از توزیع وایبال ۲ پارامتریک جهت تطابق توزیع آماری بلند مدت بازه کانون تنش مشروط بر گذشت زمان استفاده شده است. و از سوی دیگر، اثر تابع هندسی و اثر تخریب مواد ناشی از خوردگی در تحلیل قابلیت‌اطمینان نیز در نظر گرفته شده است. و در نهایت، حساسیت شاخص قابلیت‌اطمینان را بر متغیرهای مهم تصادفی تخمین زده‌اند.

وینود و راویکومار (۲۰۱۲) در تحقیقی به دنبال کاربرد تجزیه و تحلیل عوامل محدود[۲۱] بر احتمال شکست برای طراحی قلاب جرثقیل بوده‌اند و در این راستا خواص مواد و بار اِعمال شده به محصول را به عنوان متغیرهای تصادفی ورودی و حداکثر تنش و حداکثر تغییر شکل را به عنوان متغیرهای تصادفی خروجی در نظر گرفتند. نکته حائز اهمیت در این تحقیق آن است که پس از اعلام نتایج تحقیق بدین نتیجه رسیده‌اند که می‌توان از فاکتور ایمنی در نظر گرفته شده برای این محصول صرف نظر نمود و این مقدار (فاکتور ایمنی) را از ۳ به ۱/۲ رساند؛ یعنی ۲/۵ برابر آن مقداری که برای این امر در نظر گرفته شده است. واضح است که با کاهش فاکتور ایمنی تا این اندازه، تأثیر مستقیم خود را در عوامل هزینه‌ای خواهد گذاشت. زیرا از یک سو، مقدار مواد استفاده شده در قلاب را به شدت کاهش داده است و از سوی دیگر، می‌تواند تأثیر خود را در قیمت تمام شده محصول لحاظ نماید.هوانگ و همکاران[۲۲] (۲۰۱۳) با استفاده از رویکرد طراحی احتمالی به ارزیابی قابلیت‌اطمینان یک ساختار پیچیده جوش‌کاری کشتی پرداخته‌اند؛ مشروط بر اینکه رشد ترک‌های به وجود آمده به صورت همزمان و از چند منطقه کشتی نسبت یکدیگر همبسته باشند، توسعه داده شده است. فاکتورهای شدت تنش در نقطهٔ آغازین ترک، تمامی ترکیبات موجود از ترک‌ها را با طول‌های مختلف بررسی و با کمک تجزیه و تحلیل عناصر محدود محاسبه کرده‌اند. در این تحقیق برای تخمین انتشار ترک ناشی از خستگی از قانون پاریس-اِردوغان[۲۳] استفاده شده است. و در نهایت، قابلیت‌اطمینان ساختار جوشکاری شبکه‌ای همزمان با همبستگی هر دو شکست ناشی از خستگی مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱. روند کلی رسیدن به یک طراحی قابل اطمینان در هر محصول (هو و همکاران، ۲۰۱۱؛ ماریوت و همکاران، ۲۰۱۲)



شکل ۲. نمونه‌ای از الگوی اجرایی با اقتباس از (بوکر و همکاران، ۲۰۰۱)

۳. روش پژوهش

مدل ارائه شده تلفیقی است از مدل بوکر و همکاران (۲۰۰۱) و ترکیبی از دو مدل هو و همکاران (۲۰۱۱) و ماریوت و همکاران (۲۰۱۲) طراحی شده است سایر ایده‌های اضافه شده بر گرفته از تحقیقات پیشین این پژوهش به منظور تعیین قابلیت‌اطمینان بهینه شده، برای محصولاتی که طراحی و تولید شده ولی به هر دلیل طراحی بهینه‌ای نداشته‌اند- بدین معنا که قابلیت‌اطمینان آن‌ها براساس طراحی قطعی محاسبه شده است. و به منظور نیل به قابلیت‌اطمینان بهینه نیاز به طراحی مجدد با استفاده از روند پیشنهادی ارائه شده است. بر اساس پیشینه پژوهش، ارائه الگویی جهت ارزیابی و برنامه‌ریزی به منظور بهبود قابلیت‌اطمینان بالگرد در شرکت هواپیماسازی ایران با مطالعه موردی آرابه فرود انجام گرفته است. در ادامه به تفسیر گام به گام الگوی ارائه شده پرداخته می‌شود.

گام ۱: تعیین قابلیت‌اطمینان هدف یک محصول در حالت کلی، اولین گامی است که برای طراحی یک محصول قابل اعتماد برداشته می‌شود. این عدد با توجه به وظیفه و حساسیت مأموریت تعریف شدهٔ محصول نهایی که در چه شرایط و محیطی باید کار کند، یا با در نظر گرفتن ویژگی‌های سفارش داده شده از سوی مشتری، مشخص می‌شود.

گام ۲: پس از گام ۱ و مشخص شدن قابلیت‌اطمینان هدف، حال نیاز به تعیین نقش و وظیفه هر یک از قطعات می‌شود.

در این پژوهش، این مرحله با کمک ابزار FFBD انجام می‌شود.

گام ۳: پس از گام ۲ و مشخص شدن نقش هر یک از قطعات محصول، نیاز به تعیین نوع و نحوهٔ اتصالات قطعات به یکدیگر می‌شود.

در این پژوهش، این مرحله با کمک ابزار ماتریس N^2 به وقوع می‌پیوندد.

گام ۴: پس از گام ۳ و مشخص شدن نوع و نحوهٔ اتصالات قطعات به یکدیگر، نوبت به تعیین ساختار ترکیبی و چیدمان قطعات نسبت به یکدیگر می‌شود.

در این پژوهش، این مرحله با کمک ابزار RBD به بدست آورده می‌شود.

گام ۵: پس از گام ۴ و مشخص شدن ساختار ترکیبی قطعات، با طرح یک سوال مشخص می‌گردد که طراحی محصول از کدام یک روش‌ها (احتمالی یا قطعی بودن) انجام شود.

گام ۶: پس از گام ۵ و با مشخص شدن مسیر طراحی احتمالی، در این مرحله با طرح سوالی به طراحی محصول جدید یا توسعه محصول قدیمی پرداخته می‌شود.

گام ۷: پس از گام ۵ و با مشخص شدن مسیر طراحی قطعی، به تعیین آزمایشات و تست‌های مکانیکی مناسب پرداخته، و با انجام آزمایش‌های مربوطه و ثبت نتایج حاصله، به تحلیل اطلاعات فنی که شامل: جنس، ابعاد، نوع بار(های) اِعمال شده به نقاط بحرانی ریزقطعات محصول که تحت تمرکز تنش قرار دارند، پرداخته می‌شود.

گام ۸: پس از گام ۶ و مشخص شدن اینکه محصول از قبل طراحی شده است و حال نیاز به توسعه دارد، با طرح سوالی مبنی بر اینکه آیا به اطلاعات فنی محصول دسترسی وجود دارد یا خیر پرداخته می‌شود.

گام ۹: پس از گام ۶ و مشخص شدن اینکه هنوز محصول طراحی نشده است یا گام ۸ و مشخص شدن این مسئله که با وجود محصول از قبل طراحی شده و انجام مهندسی معکوس[۲۴]، اطلاعات فنی مورد نیاز به دست آمده است، با اخذ اطلاعات هدف که مشخص‌کننده ویژگی‌های محصول می‌باشند به تحلیل‌های مکانیکی فاز طراحی محصول، اعم از: کشش مواد، ابعاد و اندازه‌ها، مکان‌های تمرکز تنش و مقدار و نوع بارهای اعمال شده به تک تک قطعات بررسی و با کمک بانک‌های اطلاعاتی در دسترس به تعیین متغیرهای مذکور پرداخته می‌شود.

گام ۱۰: پس از گام ۹ و مشخص شدن اطلاعات فنی و تحلیل‌های مربوطه، در این مرحله که یکی از اساسی‌ترین مراحل پیش‌بینی یا محاسبه قابلیت‌اطمینان به شمار می‌آید، تعیین فاکتورهای ایمنی هر ریزقطعه‌ای است که در نهایت به فاکتور ایمنی کل محصول منجر می‌گردد.

گام ۱۱: پس از گام ۱۰ و مشخص شدن فاکتور ایمنی هر یک از قطعات، در این مرحله به کمک نرم‌افزارهای کامپیوتری[۲۵] (اتوکد[۲۶]، کتیا[۲۷] و سایر نرم‌افزارهای مشابه) به شبیه‌سازی و طراحی مدل محصول پرداخته می‌شود.

شبیه‌سازی محصولات به کمک کامپیوتر از یک سو، به منظور تحلیل‌های ناشی از تنش‌ها، نوع و نحوهٔ اعمال بارها به نقاط مختلف قطعات به کاربرده؛ و از سوی دیگر، در صورت نیاز توسعه یا اصلاحات ثانویه در طراحی جهت تحلیل حساسیت استفاده می‌شود.

گام ۱۲: پس از گام ۸ و با مشخص شدن اینکه محصول از قبل طراحی شده است و حال نیاز به توسعه دارد، در این مرحله با توجه به اطلاعات ثبت شده از قبل یا ساعات کارکرد قطعات که از بخش نت سازمان مربوطه استخراج می‌گردد؛ سوابق نرخ‌های شکست ریزقطعات محصول بدست می‌آید و به تخمین تابع توزیع شکست (خرابی) هر ریزقطعه پرداخته می‌شود. از این

طریق نیز می‌توان به توزیع و تابع شکست کل محصول نیز دست پیدا کرد.

گام ۱۳: پس از گام ۱۲ و با مشخص شدن تابع توزیع شکست هر قطعه، ابتدا به پیش‌بینی قابلیت‌اطمینان هر قطعه و سپس، با توجه به ساختار RBD مشخص شده در گام ۴، قابلیت‌اطمینان کل سیستم پیش‌بینی و محاسبه می‌شود.

گام ۱۴: پس از گام ۱۱ و نهایی شدن طراحی مدل مجازی شبیه‌سازی شده به کمک کامپیوتر با توجه به تمامی جزئیات محصول، در این مرحله در صورت وجود از استانداردهای صنعت مربوطه در تخصیص قابلیت‌اطمینان استفاده و در غیر این صورت، از نظر خبرگان آن صنعت جهت تکمیل این مرحله بهره گرفته می‌شود.

گام ۱۵: پس از گام ۱۴ و با مشخص شدن قابلیت‌اطمینان هر یک از قطعات براساس استانداردها یا نظر خبرگان، به مقایسه قابلیت‌اطمینان پیش‌بینی شده و تخصیص داده شده برای هر ریزقطعه پرداخته می‌شود که در نهایت به قابلیت‌اطمینان کل محصول منتهی می‌گردد (مقایسه گام‌های ۹ و ۱۳).

در صورتی که قابلیت‌اطمینان برابر با قابلیت‌اطمینان موردنظر باشد، فرآیند طراحی یک محصول قابل اعتماد به پایان می‌رسد؛ اما در غیر این صورت، به گام بعدی (گام ۱۵) جهت اصلاح خطا(های) صورت گرفته خواه در حالت طراحی مجدد[۲۸] (زمانی که قابلیت‌اطمینان پیش‌بینی شده از قابلیت‌اطمینان مورد نظر کمتر باشد) و خواه در حالت طراحی بیش حد از انتظار[۲۹] (زمانی که قابلیت‌اطمینان پیش‌بینی شده از قابلیت‌اطمینان مورد نظر بیشتر باشد) پرداخته می‌شود.

گام ۱۶: پس از گام ۱۵ و با مشخص شدن اینکه قابلیت‌اطمینان کل پیش‌بینی شده محصول با مقایسه با قابلیت‌اطمینان مورد انتظار برابری ندارند؛ ابتدا با یک رتبه‌بندی، پی به اولویت‌بندی اجرای اقدامات اصلاحی برده می‌شود و به کمک مدل شبیه‌سازی طراحی شده در گام ۱۲ به تحلیل حساسیت نقص (نقوص) به وجود آمده پرداخته می‌شود. تحلیل حساسیت کل سیستم به منظور افزایش قابلیت‌اطمینان محصول در سریع‌ترین زمان (کاراترین اقدام اصلاحی که ناشی از رتبه‌بندی قطعات می‌باشد) و نیز در صورت امکان با کمترین هزینه ممکن (نظر به اینکه در پژوهش جاری به عوامل دخیل و مهم دیگری که در تصمیم‌گیری‌های ارتقاء قابلیت‌اطمینان در شرایط برابر انجام می‌پذیرد، پرداخته نشده است. لذا شایان ذکر است، در شرایط خاص و معدودی که دو یا چند ریزقطعه شرایط برابری را برای ارتقاء قابلیت‌اطمینان داشته باشند، از عوامل یا محدودیت‌های دیگری که در عمل به آن‌ها برخورد می‌گردد، در تصمیم‌گیری‌ها کمک گرفته می‌شود. به عنوان مثال، به نظر می‌رسد به ترتیب اهمیت، می‌توان به محدودیت‌هایی از قبیل: عوامل مالی و بودجه تخصیص داده شده، تکنولوژی در دسترس، زمان موردنیاز و متخصصین و خبرگان در دسترس برای ارتقاء قابلیت‌اطمینان محصولات اشاره نمود) به توسعه و ارتقاء قابلیت‌اطمینان ریزقطعهٔ/ قطعات مربوطه محصول پرداخته می‌شود.

گام ۱۷: پس از گام ۱۶ و تجزیه و تحلیل‌های انجام گرفته برای اولویت‌بندی اولیه جهت اقدامات اصلاحی، در این مرحله به ریشه‌یابی شکست سیستم پرداخته می‌شود.

در این پژوهش، این مرحله با کمک ابزار FTA انجام می‌پذیرد.

گام ۱۸: پس از گام ۱۷ و مشخص شدن دلیل (دلایل) شکست سیستم زودتر از زمان مورد انتظار، به اقدامات اصلاحی آن(ها) براساس پیشنهادات بررسی شده از نتایج بررسی‌های انجام شده، پرداخته می‌شود.

در این پژوهش، بررسی اقدامات اصلاحی با کمک ابزار FMEA به تحقق می‌پیوندد.

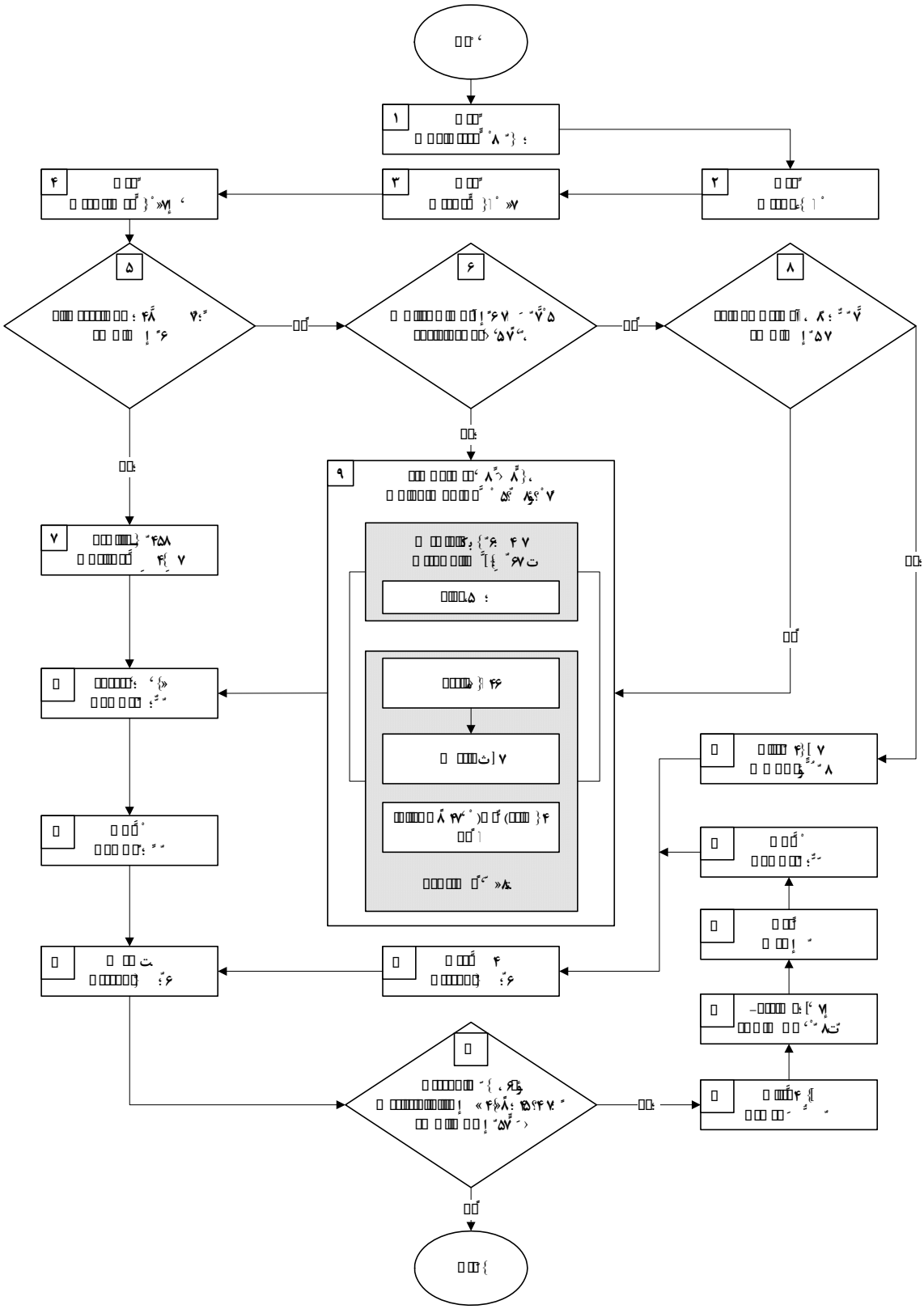
گام ۱۹: پس از گام ۱۸ و مشخص شدن پیشنهادات اصلاحی تأثیر گذار در بهبود قابلیت‌اطمینان، حال نوبت به تعیین طراحی بهینه محصول به منظور جلوگیری مجدد از دو پدیده redesign و overdesign می‌شود.

در این پژوهش، از ابزار DOE برای تکمیل گام ۱۸ جهت پیشنهادات کاربردی و بهبود قابلیت‌اطمینان در طراحی محصول استفاده شده است.

در ادامه، الگوی جامع طراحی محصول قابل اعتماد براساس گام‌های توضیح داده شدهٔ بالا، به تصویر کشیده شده است.

۴. تجزیه و تحلیل داده‌های مورد مطالعه

با توجه به ساختار ۶ عنصر اصلی و سری مجموعه قطعات آرابه فرود بالگرد، هر یک از این مجموعه‌ها می‌توانند کاندیدای یک مجموعه بحرانی برای کل سیستم به شمار آیند. بدین منظور، با مقایسه‌ی رتبه‌بندی اختلاف قابلیت‌اطمینان‌های پیش‌بینی شده از توزیع نمایی با استاندارد توسط روش FOO، به مجموعه قطعات بحرانی سیستم آرابه فرود پی برده می‌شود. واضح است، با مشخص شدن قطعات بحرانی سیستم، حال می‌توان تمرکز بررسی‌ها و پیشنهادات را به منظور توسعه و بهبود هر چه بیشتر و بهتر محصول برای نیل به قابلیت‌اطمینان هدف انجام داد و این مرحله به گام ۱۵ از الگوریتم ارائه شده در روش پژوهش اشاره شده است.



شکل ۳. شکل مفهومی از روند بنیادی بهبود قابلیت‌اطمینان (محقق ساخته)

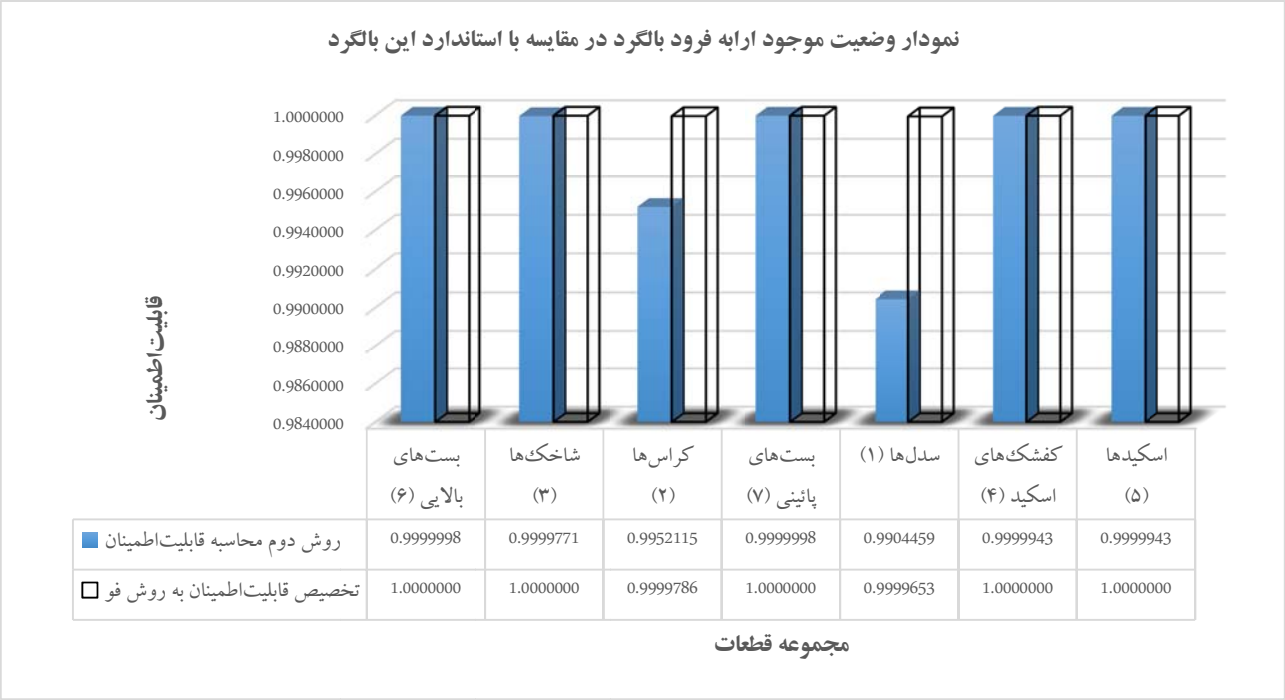
جدول ۱. اولویت‌بندی بهبود قابلیت‌اطمینان آرابه فرود ثابت بالگرد

ردیف	شاخص اجزاء	قابلیت اطمینان تخصیص داده شده	قابلیت اطمینان پیش‌بینی شده	اختلاف قابلیت اطمینان	رتبه‌بندی
1	بست‌های بالایی	1.0000000	0.9999998	0.00000023	6
2	شاخک‌ها	1.0000000	0.9999771	0.00002293	3
3	کراس‌ها	0.9999786	0.9952115	0.00476709	2
4	بست‌های پائینی	1.0000000	0.9999998	0.00000023	7
5	سدل‌ها	0.9999653	0.9904459	0.00951938	1
6	کفشک‌های اسکید	1.0000000	0.9999943	0.00000575	4
7	اسکیدها	1.0000000	0.9999943	0.00000575	5
قابلیت‌اطمینان کل سیستم آرابه فرود		0.999943898	0.985680	0.014264	-

این رتبه‌بندی جهت اولویت‌بندی بهبود قابلیت‌اطمینان هر جزء نسبت به قابلیت‌اطمینان هدف آرابه فرود انجام پذیرفته و به منظور هرچه سریع‌تر نمودن نرخ رسیدن قابلیت‌اطمینان موجود کل سیستم به قابلیت‌اطمینان مورد نظر می‌باشد.

همانطور که از ستون رتبه‌بندی جدول (۱) قابل مشاهده است، قطعات سدل و کراس به ترتیب اولویت ۱ و ۲ را به خود اختصاص داده‌اند. و این بدین معناست که در صورت توسعه و بهبود قابلیت‌اطمینان کل سیستم آرابه فرود ابتدا و قبل از هر اقدام دیگری باید به اصلاح و بهبود این دو ریزقطعه بحرانی پرداخت تا نتیجه‌ی آن به طور قابل ملاحظه‌ای در کل سیستم تأثیرگذار باشد.

اطلاعات جدول اولویت‌بندی بهبود قابلیت‌اطمینان در نمودار ستونی ذیل به تصویر کشیده شده است.



نمودار ۱. مقایسه قابلیت‌اطمینان‌های آرابه فرود ثابت بالگرد جهت اولویت‌بندی بهبود

همانطور که در نمودار ستونی فوق مشخص شده است، سدل و کراس به ترتیب اولین و دومین قطعاتی هستند که فاصله چشم‌گیری تا رسیدن به استانداردهای خود نسبت به سایر ریزقطعات سیستم آرابه فرود دارند. و همین امر باعث شده تا قابلیت‌اطمینان کل سیستم نسبت به استانداردهای تعریف شده برای این بخش از بالگرد نتواند به سطح مطلوب خود دست یابد.

بنابراین، با مشخص شدن ریزقطعاتی که براساس استانداردهای مربوطه نیاز به بهبود دارند، در ادامه با بررسی‌های انجام گرفته توسط ابزار درخت خطا، تحلیل‌های جامعی در خصوص ریشه‌یابی علل شکست و خرابی قطعات که در نهایت منجر به شکست کل سیستم می‌شوند، انجام پذیرفته است.

نکته قابل توجه آنجایی است که طراحی سدل، کراس و سایر ریزقطعات استفاده شده در آرابه فرود بالگرد یا هر پرندهٔ دیگری باید از یک حالت تعادل یا بهینه‌ای در خصوص تقویت کردن نقاط تحت تمرکز تنش پیروی کنند. چراکه این قطعات با توجه به بحرانی بودن خود در سیستم آرابه فرود، هر یک با توجه به مأموریت کل بالگرد، در یک حادثه‌ی نامترقبه می‌توانند با شکستن و قربانی شدن از حوادث بعدیِ به مراتب خطرناک‌تر جلوگیری کنند. برای مثال، در هنگام فرود شکستن یک سدل می‌تواند از برخورد بدنه بالگرد به زمین و آسیب‌های به مراتب خطرناک‌تر و شدیدتر از لحاظ جانی و مالی جلوگیری کند.

به دلیل ذکر شدهٔ فوق، گزینه تغییر طراحی در قطعات بالگرد یا هر پرندهٔ دیگری به شرط محدودیت‌های فرآیند تولید و نگهداری و تعمیرات قطعات، می‌تواند حداکثر تا سقف ۵٪ تقویت گردند. اما همانطور که اشاره شد، تقویت ریزقطعات بالگرد به منظور جلوگیری از شکست یا خرابی همیشه به معنای مفید بودن و به عنوان یک نگرش مثبت تلقی نمی‌گردد. چراکه با توجه به محدودیت‌های موجود در این صنعت اعم از: هزینه‌های بسیار گزاف تولید و خدمات نت و نیز تکنولوژی‌های مورد استفاده، و از سوی دیگر، خطرات جانی، باعث شده است که نهایت دقت در محاسبات طرح اولیه[۳۰] و در پی آن تولید انبوه[۳۱] محصول انجام گرفته شود. بنابراین، هر تغییر جزئی[۳۲] یا کلی[۳۳] در طراحی این نوع محصولات منجر به خارج کردن محصول از حالت بهینه خود خواه اقتصادی و خواه فنی می‌گردد.

شایان ذکر است، در حالت کلی با توجه به ۳ محدودیت عمدهٔ زمان، هزینه و منابع برای اجرای پروژه‌ها، طراحی بالگرد مورد مطالعه با محدودیت‌های مذکور، مراحل طراحی و تولید را پشت سر گذاشته، و به محصول فعلی منتهی شده است؛ حال آن که این موضوع، به تنهایی می‌تواند عاملی انگیزشی در راستای بازنگری مراحل طراحی و تولید این گونه از محصولات تلقی گردد. به عنوان مثال، طراحی یک پرندهٔ جنگنده در یک برههٔ زمانی خاص، می‌تواند بر هزینه‌های تولید آن با توجه به تکنولوژی در دسترس همان مقطع زمانی تأثیر قابل توجهی در جهت افزایش هزینه‌ها داشته باشد. یا به تعبیر دیگر، به لطف پیشرفت دستاوردهای تکنولوژیکی در طول زمان گذشته از ساخت یک محصول که به طور مستقیم در روش‌های تولید و هزینه‌های ناشی از آن تأثیر می‌گذارد؛ این انگیزه و منطق را به وجود می‌آورد تا به بازنگری محصولات طراحی شده در قرون گذشته اما این بار به مراتب اقتصادی و با کیفیت‌تر از قبل طراحی و تولید نمود.

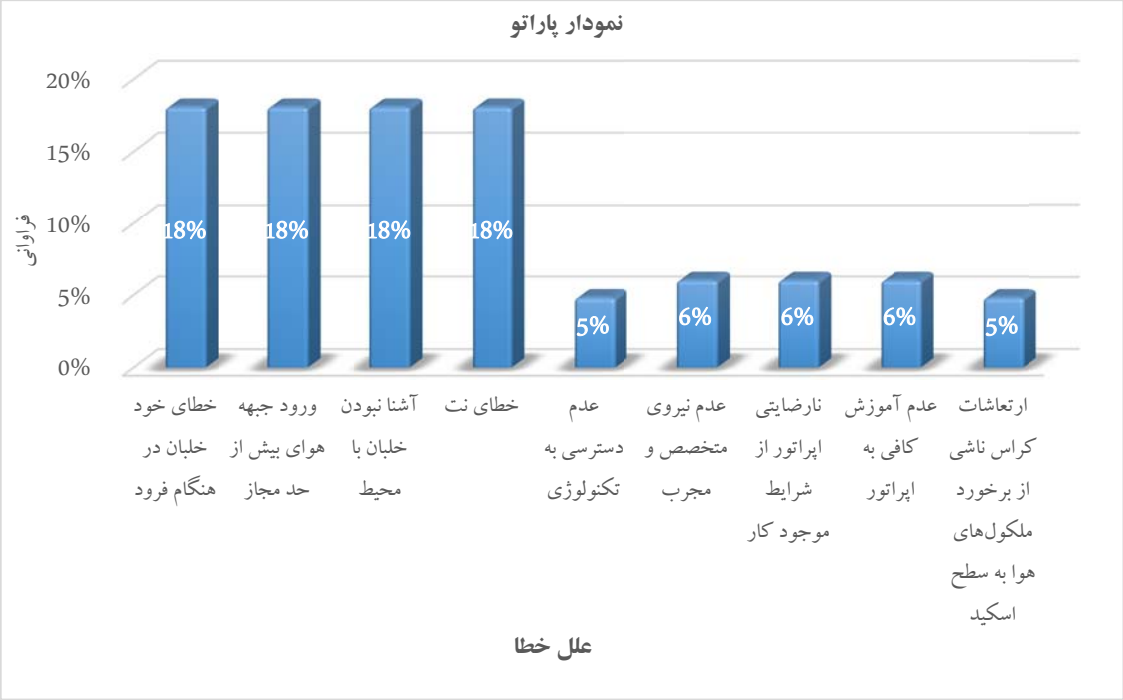
در ادامه، با توجه به بررسی‌های انجام گرفته به کمک روش FMEA، یک نمودار پاراتو جهت تشخیص درصد فراوانی خطاهای محتمل که منجر به شکست سیستم آرابه فرود بالگرد می‌شود، به تصویر کشیده شده است.

جدول ۲. درصد فراوانی علل شکست آرابه فرود ثابت بالگرد

ردیف	جدول نمودار پاراتو			مجموع RPN
	علل	تعداد	درصد فراوانی نسبی	
1	خطای خود خلبان در هنگام فرود	۱۵	٪۱۸	750
2	ورود جبهه هوای بیش از حد مجاز	۱۵	٪۱۸	150
3	آشنا نبودن خلبان با محیط	۱۵	٪۱۸	300
4	خطای نت	۱۵	٪۱۸	1500
5	عدم دسترسی به تکنولوژی	۴	٪۵	120
6	عدم نیروی متخصص و مجرب	۵	٪۶	50
7	نارضایتی اپراتور از شرایط موجود کار	۵	٪۶	1200
8	عدم آموزش کافی به اپراتور	۵	٪۶	100
9	ارتعاشات کراس ناشی از برخورد ملکول‌های هوا به سطح اسکید	۴	٪۵	400
	جمع	۸۳	٪۱۰۰	۴۵۷۰

اطلاعات آماری جدول (۲) راه را برای به تصویر کشاندن یک نمودار پاراتو از درصد علل شکست قطعات سیستم آرابه فرود هموار ساخته است.

همانطور که از نمودار (۲) مشاهده می‌شود، بیشترین درصد فراوانی شکست سیستم، ناشی از خطای خود خلبان، ورود ناگهانی جبهه‌های هوایی بیش از حد مجاز، آشنا نبودن خلبان با محیط مأموریت داده شده و خطاهای نگهداری و تعمیرات می‌باشد. به همین منظور به ۲ روش مختلف در جدول (۳) به اولویت‌بندی راهکارهای بهبود قابلیت‌اطمینان پرداخته شده است.



نمودار ۲. نمودار پاراتو آرابه فرود ثابت بالگرد

جدول ۳. اولویت‌بندی اجرای پیشنهادات بهبود قابلیت‌اطمینان آرابه فرود ثابت بالگرد

ردیف	علل	مجموع RPN	اولویت‌بندی براساس RPN	حداکثر ظرفیت RPN	نسبت مجموع RPN به حداکثر ظرفیت RPN	اولویت‌بندی براساس نسبت RPNها
1	خطای خود خلبان در هنگام فرود	750	3	15000	0.05000	4
2	ورود جبهه هوای بیش از حد مجاز	150	6	15000	0.01000	8
3	آشنا نبودن خلبان با محیط	300	5	15000	0.02000	6
4	خطای نت	1500	1	15000	0.10000	2
5	عدم دسترسی به تکنولوژی	120	7	4000	0.03000	5
6	عدم نیروی متخصص و مجرب	50	9	5000	0.01000	8
7	نارضایتی اپراتور از شرایط موجود کار	1200	2	5000	0.24000	1
8	عدم آموزش کافی به اپراتور	100	8	5000	0.02000	6
9	ارتعاشات کراس ناشی از برخورد ملکول‌های هوا به سطح اسکید	400	4	4000	0.10000	2
	جمع	4570	-	83000	0.05506	-

همانطور که از جدول (۳) قابل مشاهده است، نسبت اعداد اولویت ریسک برابر ۰/۰۵۵۰۶به دست آمده است.

۵. نتیجه‌گیری

۵-۱. نتایج حاصل از پژوهش

- الگوی جامع و یکپارچه ارائه شده در این تحقیق نواقص مدل‌های موجود مطالعات پیشین را تحت پوشش خود قرار داد.
- عوامل مؤثر در طراحی احتمالی محصول با ارائه الگوی ارائه شده شناسایی و در این تحقیق مورد بحث و بررسی قرار داده شده‌اند.
- دستیابی به ۴ اولویت‌بندی در مراحل تخصیص و پیش‌بینی قابلیت‌اطیمنان و اجرای پیشنهادات ارائه شده جهت نیل هر چه سریعتر به قابلیت‌اطمینان هدف. اولویت‌بندی‌های اول و دوم که هر دو حاکی از توسعه و بهبود قطعات سدل و کراس در سیستم آرابه فرود بالگرد است. و دو اولویت‌بندی بعدی

ناشی از دو شاخص اعداد اولویت ریسک و نسبت‌های آن‌ها انجام گرفته شده است. با توجه به وضعیت حال حاضر و محدودیت‌های موجود، از اولویت‌بندی نسبت اعداد اولویت ریسک، نتیجه به مراتب بهتری استنتاج شده است.

- با توجه به جدول (۱) و مقایسه قابلیت‌اطمینان پیش‌بینی شده آرابه فرود با استاندارد یا روش FOO، پی به پیروی ٪۹۸,۵۷ قابلیت‌اطمینان آرابه فرود بالگرد نسبت به استانداردها خواهیم برد.
- با روبه‌رو شدن با محدودیت‌های وزن و هزینه‌های ناشی از افزودن تجهیزات سنگین و گران قیمت بالگرد که خود می‌تواند در تصمیم‌گیری خرید یک پرنده نقش کلیدی داشته باشد؛ هر سازمان می‌تواند با در نظر گرفتن سوانح و سوابق موجود در بخش نت که شاهد بر میزان اشتباهات خلبانان در حالت خدمت در آن واحد یا سازمان می‌باشند، یا شرایط جوی جغرافیایی موجود و حاکم بر مناطق مأموریت داده شده که در نهایت منجر به شکست قطعات، سیستم آرابه فرود و صدمات جانی و مالی می‌گردد، به تناسب نیاز خود صرفاً از یکی از تجهیزات مذکور استفاده کنند. اجرای این رویکرد می‌تواند نقش مثبت در کاهش هزینه‌های مربوط به تجهیزات و نیز جلوگیری از حوادث جبران‌ناپذیر و هزینه‌های مربوطه داشته باشد.

با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام شده از وضعیت فعلی آرابه فرود بالگرد، طراحی آزمایش پیشنهاد شده نسبت به وضعیتی که تمام قطعات آلومینیومی می‌توانند کاندیدای فاکتورهای طراحی آزمایشات به تیتانیوم باشند (۴ قطعه بست بالایی، کراس، سدل و اسکیدهای آلومینیومی)؛ که این خود تعداد ترکیبات آزمایشات را به ۱۶ حالت مختلف می‌رساند. و با فرض ۱۰ تکرار برای انجام هر آزمایش، تعداد دفعات آزمایشات به ۱۶۰ مرتبه خواهد رسید و شاید به دلیل محدودیت‌های مالی مانع از اجرای تمام آزمایشات شود. اما با طراحی آزمایش پیشنهادی این عدد به ۴ ترکیب مختلف رسیده و با فرض ۱۰ تکرار برای هر آزمایش به ۴۰ مرتبه رسیده است و این مسئله توانسته است صرفه‌جویی چشم‌گیری در کاهش تکرار آزمایشات و در پی آن هزینه‌ها و زمان صرفه شده داشته باشد.

۵-۲. مقایسه مطالعه حاضر با مطالعات پیشین

در جدول (۴) به بررسی، مقایسه و چگونگی شکل‌گیری ارائه روند بنیادی بهبود قابلیت‌اطمینان محصول پرداخته شده است.

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، از یک سو، به عوامل مؤثر بر روند بنیادی قابلیت‌اطمینان محصولات؛ و از سوی دیگر، به چگونگی شکل‌گیری مدل پیشنهادی اشاره شده است.

۵-۳. محدودیت‌های تحقیق

۵-۳-۱. محدودیت موضوعی تحقیق

- تعیین قابلیت‌اطمینان هدف محصول محدود به استانداردها و نظر خبرگان بوده است.
- نقش نقش قطعات به کمک ابزار FFBD تشخیص داده شدند.
- تعیین اتصالات قطعات به کمک ابزار ماتریس N^2 مشخص شده‌اند.
- تعیین ساختار ترکیب قطعات و کل سیستم به کمک ابزار RBD مشخص گردید.
- در این تحقیق، مورد مطالعه از قبل طراحی و تولید شده بوده است و حال نیاز به توسعه و بهبود داشته است. به همین خاطر اطلاعات فنی و مدل شبیه‌سازی شده محصول موجود بوده است.
- به علت برون‌سپاری طراحی بالگرد مورد مطالعه، اطلاعات فنی محصول در دسترس نبوده است.
- تخمین توابع توزیع شکست و تمامی محاسبات پیش‌بینی قابلیت‌اطمینان قطعات براساس توزیع نمایی انجام گرفته است.
- برای تخصیص قابلیت‌اطمینان قطعات از روش FOO استفاده شده است.
- ریشه‌یابی آثار شکست سیستم به کمک ابزار FTA انجام گرفت.
- بررسی علل شکست سیستم و پیشنهاد رفع عیب ریزقطعات به کمک ابزار FMEA انجام پذیرفت.
- از مدل شبیه‌سازی شده جهت تحلیل حساسیت مورد مطالعه استفاده نشده است.
- طراحی آزمایشات به روش فاکتوریل پیشنهاد و صرفاً به ارائه مدل اکتفا شده است.

۵-۳-۲. محدودیت مکانی تحقیق

این تحقیق در شرکت هواپیماسازی ایران (هسا) تحت مدیریت دپارتمان بالسا بر روی یکی از بالگردهای مورد نظر انجام گرفت.

۵-۳-۳. محدودیت زمانی تحقیق

این تحقیق در بازه زمانی اسفند ماه ۱۳۹۲ آغاز و در مرداد ماه ۱۳۹۳ به پایان رسید.

جدول ۴. عوامل مؤثر در الگوی ارائه شده مبتنی بر بهبود قابلیت‌اطمینان محصول

عوامل / مدل‌های موجود	اطلاعات فنی مواد			ویژگی‌ها								ابزارها				
	شدت تنش وارده	آستانه استحکام	تحلیل تنش - استحکام	ارزیابی قابلیت اطمینان	پیش‌بینی قابلیت اطمینان	بهبود قابلیت اطمینان	بهینه‌سازی قابلیت اطمینان	تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان	تشخیص پدیده Overdesign	اولویت بندی بهبود	تخمین توزیع عمر	توزیع شکست	فاکتور ایمنی	تحلیل درخت خطا	طراحی به کمک کامپیوتر (CAD)
شهانقی (۱۳۹۰)					*									*	
لیله و همکاران (۱۹۹۹)				*		*									
بوکر و همکاران (۲۰۰۱)	*	*	*		*	*		*			*	*	*		
خرمندان و همکاران (۲۰۰۲)							*	*							*
ماهاداوان (۲۰۰۳)	*	*	*	*											
تورس و همکاران (۲۰۱۰)	*	*	*					*							*
لیو و ماهادوان (۲۰۰۹)	*	*										*			
وو و همکاران (۲۰۰۹)		*		*							*				
هوو و همکاران (۲۰۱۱)				*					*				*		
دانگ و همکاران (۲۰۱۲)		*		*											
ماریوت و همکاران (۲۰۱۲)				*						*					
وینود و همکاران (۲۰۱۲)	*	*		*											
هوانگ و همکاران (۲۰۱۳)		*		*											
مدل پیشنهادی	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

۵-۴. پیشنهادات

۵-۴-۱. پیشنهادات کاربردی

- طراحی و ساخت یک سیستم هشدار دهندهٔ دائمی در هنگام فرود که نسبت به کشیدن، برخورد بیش از حد مجاز، با یک اسکید فرود آمدن (که ناشی از موازی با سطح زمین فرود نیامدن است)، با زاویه بیش از حد مجاز فرود آمدن، و تشکیل جلسات دائمی و به طور مثال یک ساعته قبل از انجام امور مربوطه یا مأموریت‌ها به اپراتورها، تکنسین‌های فنی و حتی خلبانان در خصوص آگاه‌سازی آن‌ها از بیشترین اشتباهات یا خطاهای انجام شده در امور مربوطه اطلاع رسانی و تذکر داده شود.
- با توجه به اینکه صنعت هوایی یکی از صنایع بسیار گران قیمت و حساس محسوب می‌شود، هر آن چه که هزینه‌هایی در خصوص اقدامات پیشگیرانه صورت پذیرد، نسبت به اتفاقات و پیامدهای بعدی هر حادثه‌ای هزینه‌زا محسوب نمی‌شود و باعث جلوگیری از خطرات جانی و مالی بیشتر می‌شود. به عنوان مثال، اگر در هنگام جابجایی قطعات یدکی از انبار قطعات به خط تولید یا مونتاژ در قسمت نگهداری و تعمیرات، قطعه‌ای از لیفتراک یا هر وسیلهٔ حمل‌کنندهٔ دیگری به زمین افتاد، آن قطعه باید به آزمایشگاه‌های مربوطه جهت تشخیص عیوب احتمالی ارجاع و در صورت نیاز رفع عیب یا از خط تولید و مونتاژ مردود گردند. و آن که با یک سهلنگاری ساده، برای کاهش هزینه‌های نت بدون آنکه این قطعات به آزمایشگاه‌های مربوطه ارجاع داده شوند، به خط تولید ارسال شوند و در نهایت منجر به حادثه‌های غیرقابل جبران جانی و مالی گردد.
- طراحی یک سیستم جامع استخدامی جهت ارتقاء شغل و حرفه کارکنان و بهره‌مندی نیروهای جوان و فاقد تجربه در کنار تکنسین‌های مجرب باعث می‌گردد تا شکاف سنی و حرفه‌ای نیروهای در حال خدمت از یکدیگر کاهش یابد و به سادگی حجم عظیم اطلاعات و تجارت به دست آمدهٔ نیروهای با سابقه و مجرب به نیروهای جوان و فاقد تجربه انتقال یابد. طی بررسی‌های انجام شده، مدت زمانی ۳ ساله بهترین و اقتصادی‌ترین دورهٔ زمانی جهت استخدام و بازنشسته کردن نیروهای صنایع هوایی با توجه به دلایل ذکر شده محسوب می‌گردد.
- فرهنگ‌سازی رعایت از اصول استانداردها و ایجاد علاقه در کارکنان، خود می‌تواند راهکاری مناسب در جهت کاهش اشتباهات و خطاهای انسانی شود.
- به طور کلی و در راستای کاهش تلفات جانی و مالی ناشی از خطاهای صورت گرفته، آموزش‌های صحیح تئوری و عملی کافی، رعایت اصول استاندارد و نکات ایمنی و نیز اقدامات به موقع جهت تعویض و تعمیرات در بخش نت سازمان که به ترتیب هر یک با مسئولیت‌های مدیریت سازمان، خلبان و مدیریت نت می‌باشد؛ با رعایت موارد مذکور حاصل می‌شود.

۵-۴-۲. پیشنهادات تحقیقات آتی

- بررسی شاخص‌های دیگری به غیر از شاخص‌های موجود در روش فو که تأثیری در محاسبه نرخ خرابی داشته و در نهایت می‌توان در قابلیت‌اطمینان قطعات و محصولات لحاظ نمود.
- با توجه به روند محاسباتی انجام شده که از جریان بلوک دیاگرام شروع، و سپس با تحلیل درخت خطا و تحلیل آثار و حالات شکست همراه بوده است؛ می‌توان نتایج حاصل از پژوهش جاری را به کمک طرح آزمایش‌های پیشنهادی و ثبت نتایج حاصله به نقطهٔ ایده‌آل نزدیک یا بهینه‌سازی نمود.
- استفاده از روش پوکایوکه[۳۴] جهت بررسی‌های تخصصی اشتباهات غیر عمد انسانی در فرآیندهای ساخت (تولید) یا نگهداری و تعمیرات صنایع هوایی که بیشترین سهم را در وقوع حوادث دارد، می‌توان موضوع مناسبی برای تحقیقات آتی در زمینه صنایع هوایی و سایر صنایع مشابه باشد.
- با توجه به طراحی آزمایشات پیشنهاد شده در این پروژه که صرفاً تغییرات یک خروجی (جواب) را از طراحی آزمایشات مورد بررسی قرار داده است، می‌توان به جای یک خروجی، چندین خروجی دیگر را با کمک روش پاسخ سطح[۳۵] جهت اجرای آزمایشات طراحی نمود تا از هزینه و زمان صرف شده در راستای انجام آزمایشات، بیشترین بهره با بهترین اطلاعات حاصل آید. در این خصوص می‌توان با طرح آزمایشی نه تنها به بررسی طول عمر محصول (MTBF) پرداخت، بلکه به هزینه‌های تولید قطعات در سطوح مختلف آزمایش و حتی میزان مصرف سوخت بالگرد که یکی از مهم‌ترین مباحث در علوم هوایی است و سایر اطلاعات مشابه که بتواند در تصمیم‌گیری نهایی کمک نماید، پرداخته شود.

با توجه به مطالعات و مدل ارائه شده در این تحقیق، می‌توان در بخش طراحی آزمایشات جهت بهینه‌سازی قابلیت‌اطمینان طراحی محصول از ترکیب‌های تعادلی هزینه- ایمنی یا هزینه- کیفیت و سایر موارد مشابه بهره‌مند شد.

پی‌نوشت

1. Raisinghani et al.
2. Ericson
3. Ben-Daya et al.
4. Stapelberg, R. F.
5. Lyle et al.
6. Kharmanda et al.
7. Computer-Aided Reliable and Optimal Design (CAROD) System
8. Mahadevan and Ni

9. Miner's Rule
10. MSC/NASTRAN and MSC/FATIGUE
11. Torres et al.
12. Metallographic: A study of metals especially with the microscope.
13. Fractographic: A study of curved shapes for which any suitably chosen part is similar in shape to a given larger or smaller part when magnified or reduced to the same size.
14. Liu and Mahadevan
15. Equivalent Initial Flaw Size- EIFS
16. Kitagawa–Takahashi Diagram
17. Wu et al.
18. Marriott et al.
19. Low Volume-High Integrity
20. Dong et al.
21. Finite Element Analysis-FEA
22. Huang et al.
23. Paris-Erdogan Low

۲۴. این وضعیت، بیانگر موقعیتی است که محصول موردنظر ساخت داخل کشور نبوده است و قیمت آن برای خرید بسیار قابل توجه باشد.

25. Computer-Aided Design- CAD
26. AutoCAD Software
27. Catia Software
28. Redesign
29. Overdesign
30. Prototyping Calculations
31. Mass Production
32. Minor Change
33. Major Change
34. Poka-Yoke Methodology
35. Respond Surface Method- RSM

مراجع

[۱] شهانقی، کامران؛ شریفی، سید محمد مهدی؛ غلامی، حسین؛ کرباسیان، مهدی (۱۳۹۰). طراحی الگویی برای تخمین قابلیت اطمینان سازه ماهواره‌بر به روش شبکه‌های بیزین، دومین کنفرانس مهندسی قابلیت اطمینان.

[2] Ben-Daya M, Duffuaa SO. Raouf A, Knezevic J, Daoud AK-Handbook of Maintenance Management and Engineering, ISBN-9781848824713, (2009).

[3] Booker JD, Raines M, Swift KG. Designing capable and reliable products. Butterworth – Heinemann, (2001).

[4] Dong W, Moan T, Gao Z. Fatigue reliability analysis of the jacket support structure for offshore wind turbine considering the effect of corrosion and inspection, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 106, No. 1, (2012), pp. 11-27.

[5] Ericson CA. Hazard analysis techniques for system safety, John Wiley & Sons, (2005).

[6] Hu D, Wang R, Tao Z. Probabilistic design for turbine disk at high temperature, Aircraft Engineering Huang W, Garbatov Y, Guedes Soares C. Fatigue reliability assessment of a complex welded structure subjected to multiple cracks, Engineering Structures, Vol. 56, No. 1, (2013), pp. 868-879.

[7] Kharmanda G, Mohamed A, Lemaire M. CAROD: computer-aided reliable and optimal design as a concurrent system for real structures, International Journal of CAD/CAM, Vol. 2, No. 1, (2009), pp. 1-12.

[8] Liu Y, Mahadevan S. Probabilistic fatigue life prediction using an equivalent initial flaw size distribution, International Journal of Fatigue, Vol. 31, No. 3, (2009), pp. 476-487.

[9] Lyle D, Chan Y, Head E. Improving information - network performance: reliability versus invulnerability, IIE Transactions, Vol. 31, No. 9, (1999), pp. 909-919.

[10] Mahadevan S, Ni K. Damage tolerance reliability analysis of automotive spot-welded joints, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 81, No. 1, (2003), pp. 9-21.

[11] Marriott B, Garza-Reyes JA. Soriano-Meier H, Antony J. An integrated methodology to prioritise improvement initiatives in low volume-high integrity product manufacturing organizations, Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 24, No. 2, (2013), pp. 197-217.

[12] Raisinghani MS, Ette H, Pierce R, Cannon G, Daripaly P. Six Sigma: concepts, tools, and applications, Industrial Management & Data Systems, Vol. 105, No. 4, (2005), pp. 491-505.

[13] Stapelberg RF. Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design, London: Springer, (2009), p. 16.

[14] Torres Y, Gallardo JM, Dominguez J, Jiménez EFJ. Brittle fracture of a crane hook, Engineering Failure Analysis, Vol. 17, No. 1, (2010), pp. 38-47.

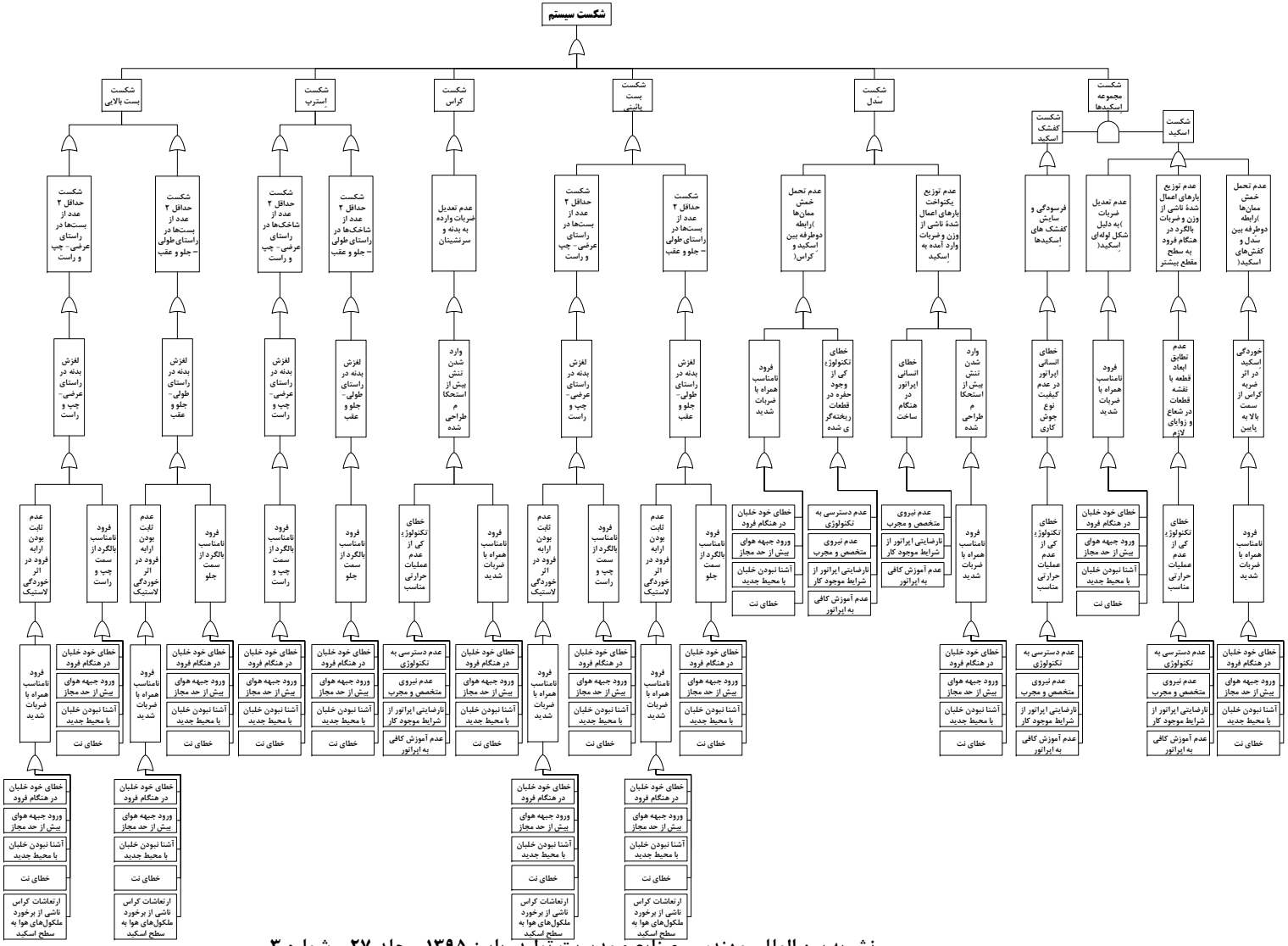
[15] Vinodh S, Ravikumar R. Application of probabilistic finite element analysis for crane hook design, Journal of Engineering, Design and Technology, Vol. 10, No. 2, (2012), pp. 255-275.

[16] Wu B, Brückner-Foit A, Li Q, Chen L, Fu J, Zhang C. A reliability assessment method for structural metallic component with inherent

flaws based on finite element analysis and probabilistic fracture mechanics model, International Journal of Fatigue, Vol. 31, No. 11, (2009), pp. 1882-1888.

پیوست

نمودار تحلیل درخت خطا به صورت زیر به نمایش گذاشته شده است.



جدول تحلیل حالات بالقوه شکست و آثار آن به صورت زیر به نمایش در آمده است.

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	Severity شدت (S)	علل	وقوع (O) Occurrence	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	شدت Severity (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
1											خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین				0
2											ورود جبهه هوای بیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودِر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودِر رادار				0
3										10	آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تپه گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تپه گرافی				0
4	1										خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله سورانکاری، تغیر مواد	ایرانور مربوطه		از آلومینیوم به تیتانیوم				0
5										2	ارتعاشات کراس ناشی از برخورد ملکول‌های هوا به سطح اسکید	2	کنترل کیفیت	5	100	انجام طرح اصلاحی جهت بهبود و فرکانس طبیعی سیستم	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		-				0
6										10	خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین				0

1											خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین				0
2											ورود جبهه هوای بیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودِر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودِر رادار				0
3										10	آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تپه گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تپه گرافی				0
4	1										خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله سورانکاری، تغیر مواد	ایرانور مربوطه		از آلومینیوم به تیتانیوم				0
5										2	ارتعاشات کراس ناشی از برخورد ملکول‌های هوا به سطح اسکید	2	کنترل کیفیت	5	100	انجام طرح اصلاحی جهت بهبود و فرکانس طبیعی سیستم	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		-				0
6										10	خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین				0

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	Severity (S) شدت	علل	وقوع Occurrence (O)	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	Severity شدت (S)	Occurrence وقوع (O)	Detection تشخیص (D)	RPN (D.O.S)
7											ورود جبهه هوای پیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودِر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودِر رادار				
8											آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تهیه گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تهیه گرافی				
9											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله سورانتکاری، تغیر مواد	اپراتور مربوطه		از آلومینیوم به تیتانیوم				
10											خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین				
11											ورود جبهه هوای پیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودِر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودِر رادار				
12											آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تهیه گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تهیه گرافی				
13											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله سورانتکاری، تغیر مواد	اپراتور مربوطه		از آلومینیوم به تیتانیوم				

Severity شدت (S)	آثار
10	شکست بست‌بالایی
	فرود نامناسب همراه با ضربات شدید
	عدم ثابت بودن ارابه فرود در اثر خوردگی لاستیک
	لغزش بدنه در راستای طولی - جلو و عقب
	شکست حداقل ۲ عدد از بست‌ها در راستای طولی – جلو و عقب

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	Severity (S) شدت	علل	وقوع Occurrence (O)	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	Severity شدت (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
14											برخورد جرثقیل ناشی از برخورد ملکول‌های هوا به [illegible]	2	کنترل کیفیت	5	100	اصلاحی جهت بهبود و فرکانس طبیعی اسکیدها و انجام طرح	تولید کننده/ پشتیبانی کننده	-	-				0
15											خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	طراحی ساخت سامانه ودِر رادار				0
16									فرود نامناسب بالگرد از سمت جلو	10	ورود جبهه هوای پیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودِر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده	سامانه ودِر رادار	طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تپو گرافی				0
17											آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تپو گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده	مرحله سوزانکاری، تغیر مواد	دو بار چک کردن	ایراتور مربوطه	از آلومینیوم به تیتانیوم	کنترل کیفیت	0
18											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	مرحله سوزانکاری، تغیر مواد	تولید کننده/ پشتیبانی کننده	دو بار چک کردن	ایراتور مربوطه	از آلومینیوم به تیتانیوم	چک ماهیانه خلبان	ورود جبهه هوای پیش از حد مجاز	0
19												10		5	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین			خطای خود خلبان در هنگام فرود	0
20														1	10	سامانه ودِر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودِر رادار			مطالعه گزارش هواشناسی	0

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	شدت Severity (S)	علل	وقوع (O) Occurrence	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	شدت Severity (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
21											آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تپو گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تپو گرافی				0
22											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله برش ورق	اپراتور مربوطه		-				0
23											خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین				0
24											ورود جبهه های پیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودر رادار				0
25										10	آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تپو گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تپو گرافی				0
26									شکست استرپ		خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله برش ورق	اپراتور مربوطه		-				0
27	3	کراس ها (اگو مینوم)		شکست کراس				-	شکست کراس	10	عدم دسترسی به تکنولوژی	3	-	-	30	-			-				0

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	شدت Severity (S)	علل	وقوع Occurrence (O)	کنترل‌های جاری	تشخیص D(Detection)	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	شدت Severity (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
28											عدم نیروی متخصص و مجرب	1	گذراندن آموزش‌ها و اخذ گواهینامه	1	10	-			-			0
29									کاهش طول عمر کرانس		نارضایتی اپراتور از شرایط موجود کار	3	-	8	240	مشاوران صنعتی	مدیریت سازمان		-			0
30											علم آموزش کافی به اپراتور	2	گذراندن آموزش‌ها و اخذ گواهینامه	1	20	-			-			0
31											خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین			0
32					فرود نامناسب همراه با ضربات شدید				-		ورود جبهه هوای بیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودر رادار			0
33									شکست کرانس	10	آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تهیه گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تهیه گرافی			0
34											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله عملیات حرارتی، تغیر مواد	اپراتور مربوطه		از آلومینیوم به تیتانیوم			0

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	شدت Severity (S)	علل	وقوع (O) Occurrence	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	شدت Severity (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
35	4	بست‌های پانچی (فولاد ضد زنگ)	اتصال دهنده و نگهدارنده آرایه فرود به بدنه در راستای طولی و عرضی	شکست بست پانچی	شکست حداقل ۲ عدد از بست‌ها در راستای عرضی - چپ و راست	لغزش بدنه در راستای عرضی - چپ و راست	عدم ثابت بودن آرایه فرود در اثر خوردگی لاستیک	فرود نامناسب همراه با ضربات شدید	شکست بست پانچی	10	خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	0			0
36											ورود جبهه های پیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ورِدِ رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه وِردِ رادار				0
37										10	آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تپوگرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تپوگرافی				0
38											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله سوراخکاری	اپراتور مربوطه		-				0
39										10	ازدحامات کراس ناشی از برخورد ملکول‌های هوا به سطح اسکید	2	کنترل کیفیت	5	100	تحلیل ازدحامات اسکیدها و انجام طرح اصلاحی جهت بهبود و فرکانس طبیعی سیستم ارابه فرود	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		-				0
40										10	خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین				0

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	شدت Severity (S)	علل	وقوع Occurrence (O)	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	شدت Severity (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
41											ورود جبهه های پیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانهٔ ودر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودر رادار			0
42											آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تپو گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تپو گرافی			0
43											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله سورا‌خکاری	اپراتور مربوطه		-			0
44											خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین			0
45											ورود جبهه های پیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودر رادار			0
46											آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تپو گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تپو گرافی			0
47											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله سورا‌خکاری	اپراتور مربوطه		-			0

									شکست بست پانتی	10													
									فرود نامناسب همراه با ضربات شدید														
									عدم ثابت بودن ارابه فرود در اثر خوردگی لاستیک														
									لغزش بلنده در راستای طولی - جلو و عقب														
									شکست حداقل ۲ عدد از بست‌ها در راستای طولی – جلو و عقب														

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	Severity (S) شدت	علل	وقوع Occurrence (O)	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	Severity شدت (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
48											ارتعاشات کراس ناشی از برخورد ملکول‌های هوا به سطح اسکید	2	کنترل کیفیت	5	100	تحلیل ارتعاشاتی اسکیدها و انجام طرح اصلاحی جهت بهبود و فرکانس طبیعی سیستم ارایه فرود	تولید کننده/ پشتیبانی کننده	-				0
49											خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین				0
50											ورود جبهه هوای بیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودر رادار				0
51											آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تپوگرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تپوگرافی				0
52										10	خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله سوراخکاری	اپراتور مربوطه		-				0
53	5	سدل‌ها (آلومینیوم)		شکست سدل					شکست بست‌پانچی	10	خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین				0
			تحمل خستش سازه‌ها جهت جلوگیری از بازشدن دهنهٔ اسکیدها و توزیع کننده بارهای وارده بر روی	شکست سدل		فرود نامناسب همراه با ضربات شدید	عدم تحمل خستش سازه‌ها (رابطه دوطرفه بین اسکید و کراس)	-															

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	شدت Severity (S)	علل	وقوع Occurrence (O)	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	شدت Severity (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
54											ورود جبهه هوای پیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانهٔ ودر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه وِدر رادار			0
55											آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تپو گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تپو گرافی			0
56											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله عملیات حرارتی، تغیر مواد	اپراتور مربوطه		از آلومینیوم به تیتانیوم			0
57											عدم دسترسی به تکنولوژی	3	-	-	30	-			-				0
58						خطای تکنولوژیکی از وجود حفره در قطعات ریخته گری شده		-	-	10	عدم نیروی متخصص و مجرب	1	گذراندن آموزش ها و اخذ گواهینامه	1	10	-			-				0
59									کاهش طول عمر سلل	10	نارضایتی اپراتور از شرایط موجود کار	3	-	8	240	مشاوران صنعتی	مدیریت سازمان		-				0

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	شدت Severity (S)	علل	وقوع Occurrence (O)	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	شدت Severity (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
60											عدم آموزش کافی به اپراتور	2	گذراندن آموزش‌ها و اخذ گواهینامه	1	20	-	-	-	-			0
61									شکست سلل		عدم نیروی متخصص و مجرب	1	گذراندن آموزش‌ها و اخذ گواهینامه	1	6	-	-	-	-			0
62										6	نارضایتی اپراتور از شرایط موجود کار	3	-	8	144	مشاوران صنعتی	مدیریت سازمان	-	-				0
63								-	کاهش طول عمر سلل		عدم آموزش کافی به اپراتور	2	گذراندن آموزش‌ها و اخذ گواهینامه	1	12	-	-	-	-				0
64							-				خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین				0
65							فرود نامناسب همراه با ضربات شدید	-	شکست سلل	10	ورود جبهه هوای بیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ورد رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ورد رادار				0
66						وارد شدن تنش بیش از استحکام طراحی شده					آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	دوربین‌های تهیه گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده سامانه		دوربین‌های سامانه				0
					عدم توزیع یکنواخت بارهای اعمال شدهٔ ناشی از وزن و ضربات وارد آمده به اسکید																			

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	شدت Severity (S)	علل	وقوع Occurrence (O)	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	شدت Severity (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
67											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله عملیات حرارتی، تغییر مواد	اپراتور مربوطه		از آلومینیوم به تیتانیوم			
68			جلوگیری از سایش زودرس اسکیدها و جلوگیری از سُر خوردن بالگرد در هنگام فرود								عدم دسترسی به تکنولوژی	3	-	-	30	-		-	-			
69								-	شکست اسکید	10	عدم نیروی متخصص و مجرب	1	گذراندن آموزش ها و اخذ گواهینامه	1	10	-	مدیریت سازمان		-			
70	6	مجموعه اسکیدها (فولاد ضد زنگ و آلومینیوم)									نارضایتی اپراتور از شرایط موجود کار	3	-	8	240	مشاوران صنعتی			-			
71				شکست مجموعه اسکیدها	شکست کفشک اسکید	فرسودگی و سایش کفشک های اسکیدها	خطای تکنولوژیکی از عدم عملیات حرارتی مناسب		کاهش طول عمر اسکید		عدم آموزش کافی به اپراتور	2	گذراندن آموزش ها و اخذ گواهینامه	1	20	-			-			
72			پارهای ناشی از وزن و ضربات بالگرد در هنگام فرود به سطح		شکست اسکید	ضربات (به دلیل شکل لوله‌ای اسکید)	عدم تعدیل شدید	همراه با ضربات	ورود نامناسب		خطای در هنگام فرود	10	چک ماهیانه خلبان	1	50	نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده سامانه هشدار		نزدیک به سطح	سامانه هشدار			

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	Severity (S) شدت	علل	وقوع Occurrence (O)	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	شدت Severity (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
73											ورود جبهه هوای پیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودر رادار			0
74											آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تهبگرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تهبگرافی			0
75											خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	دو بار چک کردن مرحله شکل‌دهی، تغیر مواد	اپراتور مربوطه		از آلومینیوم به تیتانیوم			0
76											عدم دسترسی به تکنولوژی	3	-	-	30	-	-		-			0
77										10	عدم تطابق ابعاد قطعه با نقشه قطعات در شعاع و زوایای لازم	1	گذراندن آموزش‌ها و اخذ گواهینامه	1	10	-	-		-			0
78									شکست کفشک‌های اسکید	10	خطای تکنولوژیکی از عدم عملیات حرارتی مناسب	3	-	8	240	مشاوران صنعتی	مدیریت سازمان	کاهش طول عمر کفشک‌های اسکید	-	نارضایتی اپراتور از شرایط موجود کار			0

ردیف	دسته بندی	شاخص‌ها اجزاء	عملکرد	خطای سطح ۱	خطای سطح ۲	خطای سطح ۳	خطای سطح ٤	خطای سطح ٥	آثار	Severity (S) شدت	علل	وقوع Occurrence (O)	کنترل‌های جاری	تشخیص Detection) D(	RPN (D.O.S)	اقدامات پیشنهادی	مسئولیت‌پذیری	زمان هدف	نحوهٔ اجرای پیشنهاد	Severity شدت (S)	وقوع Occurrence (O)	تشخیص Detection (D)	RPN (D.O.S)
79											عدم آموزش کافی به اپراتور	2	گذراندن آموزش ها و اخذ گواهینامه	1	20	-			-			0
80											خطای خود خلبان در هنگام فرود	5	چک ماهیانه خلبان	1	50	سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه هشدار نزدیک به سطح زمین			0
81											ورود جبهه هوای پیش از حد مجاز	1	مطالعه گزارش هواشناسی	1	10	سامانه ودر رادار	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه ودر رادار			0
82										10	آشنا نبودن خلبان با محیط	2	مطالعه گزارش آشنایی با محیط	1	20	سامانه دوربین‌های تهیه گرافی	تولید کننده/ پشتیبانی کننده		طراحی ساخت سامانه دوربین‌های تهیه گرافی			0
83									شکست کفشک‌های اسکید		خطای نت	2	کنترل کیفیت	5	100	مرحله شکل دهی، تغییر مواد	اپراتور مربوطه	دو بار چک کردن	از آلومینیوم به تیتانیوم				0