مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 13، ص‌ص 7 - 18

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

الگوریتم طراحی سیستمی سامانه‌های ویژه مأموریت با رویکرد قابلیت اطمینان

مهدی فکور[1*]، نگار مؤتمن[2]

1- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی 14155-6619، mfakoor@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 31 فروردین 1393
پذیرش: 25 تیر 1393
ارائه در سایت: 12 مهر 1393

کلید واژگان:
قابلیت اطمینان
دسترس‌پذیری
تحلیل درخت خطا
تحلیل مارکوف
گسترش پنل خورشیدی

چکیده

در این مقاله یک الگوریتم کارآمد در طراحی سیستمی سامانه‌های ویژه مأموریت با رویکرد قابلیت اطمینان ارائه شده و روند و چگونگی پیشرفت آن توضیح داده می‌شود. با به‌کارگیری این الگوریتم در طراحی زیرسیستم‌های سامانه‌های فضایی می‌توان به صورت سیستماتیک و استراتژیک به یک طراحی بهینه از لحاظ پارامترهای قابلیت اطمینان دست‌یافت. با واردکردن پارامترهای درخت محصول شامل اطلاعات کلی زیر سیستم‌ها در الگوریتم و با شناخت حالت‌های شکست و روند رخداد هر حالت شکست، طراحی را اصلاح نموده و تمهیدات لازم برای جلوگیری و یا کاهش احتمال رخداد حالت شکست در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این رفتار دینامیکی سیستم تعیین شده و پاسخ حالت ماندگار و دائم سیستم با توجه به شرایط اولیه استخراج می‌گردد. در این راستا برای آشنایی بهتر با روند الگوریتم ارائه شده در ابتدا به تعریف یک سری مفاهیم اولیه و روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان نظیر تحلیل درخت خطا، تحلیل تأثیر حالت شکست، تحلیل نمودار بلاک قابلیت اطمینان و تحلیل مارکوف می‌پردازیم. توزیع قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری برای فازهای مختلف رهایش و گسترش پنل خورشیدی با استفاده از نرم‌افزار ویندچیل به دست آمده و تأثیر محدوده‌های نرخ شکست اجزای افزونه در قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری و ظرفیت عملکردی کل سیستم بررسی شد. نتایج به دست‌آمده از تحلیل فازهای مختلف رهایش و گسترش نشان دادند که سیستم در انتهای هر فاز در حالت ماندگار خود قرار دارد. همچنین مشخص شد با کاهش نرخ شکست اجزای افزونه قابلیت اطمینان، ظرفیت عملکرد و دسترس‌پذیری کل سیستم افزایش می‌یابد و به حالت پایداری می‌رسد.

System design algorithm for mission-oriented systems with reliability approach

Mehdi Fakoor[1*], Negar Motamen[2]

1- Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 14155-6619 Tehran, mfakoor@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 April 2014
Accepted 16 July 2014
Available Online 04 October 2014

Keywords:
Reliability, Availability
Fault Tree Analysis (FTA)
Markov Analysis
Solar Panel Deployment

ABSTRACT

In this paper an efficient algorithm of system design with reliability approach is presented. Using this algorithm in subsystem designing of spatial systems may lead to systematically optimized design with reliability parameters attitude. By applying item tree parameters, including general subsystem parameters into the algorithm and by knowing failure modes and the occurrence rate of each failure mode, the design may be improved and necessary reconsiderations can be applied in order to prevent or reduce the probability of failure mode. Moreover, dynamic behavior of system is determined and steady state response of system is obtained according to initial conditions. First, some basic conceptual definitions including reliability, availability, capacity and failure rate are explained, then various reliability analysis methods like Fault Tree Analysis (FTA), Failure Mode Effect Analysis (FMEA), Reliability Block Diagram (RBD) and Markov analysis are discussed. Reliability and availability distribution over different phases of unlocking and deploying mechanisms are illustrated using Windchill solution. Subsequently the effect of the different ranges of failure rates of added components on reliability, availability and capacity of whole system is investigated. By analyzing the reliability and availability of system for different phases, it was found that the whole system is under stable situation at the end of each phase. Also, results showed that the reliability, availability and capacity of whole system increased and reached a stable level by minimizing the failure rate of the redundant components.

1- مقدمه

در تمامی سیستم‌های مهندسی در ایران اعم از سیستم‌های نیروگاهی، صنایع هوافضا، صنایع پتروشیمی، نفت و گاز و تجهیزات هسته‌ای، قابلیت اطمینان از ویژگی بسیار مهم در برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری کوچک‌ترین و ساده-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Fakoor, N. Motamen, System design algorithm for mission-oriented systems with reliability approach, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 13, pp. 7-18, 2015 (In Persian)

ترین زیرسیستم‌ها تا بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین سیستم‌ها است. در بسیاری از صنایع، از کار افتادن المان‌ها و زیرسیستم‌ها موجب بروز اختلال در سطح‌های مختلفی می‌شود و نه‌تنها خسارت‌های مالی و جانی سنگینی به بار می‌آورند، بلکه تهدید شدیدی برای جامعه و محیط زیست نیز تلقی می‌شوند. از این‌رو مهندسان و مدیران فنی که در جوامع مدرن مسئول برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سیستم‌های پیچیده می‌باشند، بایستی در تولید محصول‌ها و سیستم‌های پایای اطمینان بخش و ایمن کوشا باشند. چرا که طبق قوانین امروزی، تأمین‌کنندگان مواد و لوازم مخصوصاً طراحان و سازندگان محصول به عنوان مسئول خسارت‌های وارد آمده به سبب بروز عیب در محصول شناخته می‌شوند [1].

پیدایش شیوه‌های ارزیابی قابلیت اطمینان در ابتدا در صنایع هوافضا و کاربردهای نظامی در جنگ جهانی دوم در آلمان شکل گرفت [1]. پس از آن صنایعی مانند صنایع هسته‌ای با حساسیت بالا در جهت تضمین ایمنی و قابلیت اطمینان رآکتورهای هسته‌ای برای تولید انرژی الکتریکی و یا صنایع با فرآیندهای پیوسته مانند صنایع فولاد و صنایع شیمیایی که در آن‌ها هر ساعت از توقف در فرآیند، به علت وقوع عیب، موجب وارد آمدن خسارت‌های بزرگ مالی، جانی و آلودگی زیست محیطی می‌شود، ارزیابی قابلیت اطمینان را مورد توجه قرار دادند.

به عنوان مثال می‌توان به حادثه‌ی متلاشی شدن فضاپیمای چلنجر در 28 ژانویه 1986 اشاره کرد که هفتاد و سه ثانیه پس از پرتاب بر فراز اقیانوس اطلس اتفاق افتاد و منجر به کشته شدن هفت تن از اعضای کابینه فضاپیما شد [1]. دلیل این حادثه شل بودن پیچ نگه‌دارنده مخزن سوخت فضاپیما گزارش شد [1]. همچنین در صنایع هسته‌ای به حادثه نیروگاه چرنوبیل در سال 1986 می‌توان اشاره کرد [1]. همچنین بسیاری از حوادث دیگر که خسارت‌های چشمگیر و شدیدی بر روی جامعه و محیط زیست داشته‌اند. تمامی این موارد اهمیت ارزیابی قابلیت اطمینان، ایمنی و احتمال خطر را مورد تاکید قرار داده است.

قابلیت اطمینان بالا در طول عمر انجام مأموریت یکی از نقاط تمرکز مهم در طراحی مکانیزم‌های فضایی است. دقت بالا در حین طراحی و ساخت مکانیزم برای یک بازه زمانی معین معمولاً منجر به کارکرد مکانیزم در بازه زمانی بیشتر می‌شود.

برای درک بهتر اهمیت قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری سیستم به ذکر چند نمونه از کارهای انجام شده می‌پردازیم.

هانگبین لی و همکاران از روش مدل‌سازی تصادفی برای مطالعه مسئله ارزیابی قابلیت اطمینان برای سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای سرویس[1] استفاده کردند و با ارائه شاخص قابلیت اطمینان و روش ارزیابی آن به کنترل عملکردی سیستم پرداختند [2].

روئی پنگ و همکاران به بررسی قابلیت اطمینان برای سیستم‌های مأموریت فازی[2] با ساختار موازی، با پوشش‌دهی بعد از رخداد خطای سرویس[3] و با استفاده از روش ترکیبی دیاگرام‌های تصمیم‌گیری چندارزه[4] پرداختند [3].

اکس زانگ و همکاران به ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم[5] به‌صورت مسئله استنباط آماری شبکه‌های بایاسی[6] پرداختند. نتایج به دست آمده قابلیت روش ارائه شده را در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم نشان دادند [4].

کائونان ونگ و همکاران الگوریتمی برای تحلیل قابلیت اطمینان برای سیستم‌های باینری غیرقابل تعمیر که تحت رخدادهای گسترش و جداسازی شکست به همراه تأثیرات شکست کلی و جزیی[7] قرار می‌گیرند، ارائه کرده و روشی ترکیبی برای تحلیل شکست گسترش یافته با در نظر گرفتن اثرات کلی و جزیی ارائه کردند [5].

یوچانگ مو و همکاران به تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های چندفازه تحمل‌پذیر خطا[8] با مدت زمان تصادفی فاز پرداخته و یک روش حل با توزیع مدت زمان فاز تصادفی ارائه کردند [6].

پائولو بوچی و همکاران با ترکیب کردن مدل‌سازی مارکوف و تکنیک مسیر دهی سلول به سلول[9]، مدل دینامیکی درخت خطای سرویس را ارائه کرده و نشان دادند که درخت خطای سرویس را می‌توان برای هر سیستم ارزیابی خطر احتمالی[10] که در آن تحلیل زیرسیستم خاصی مورد نیاز است، به کار برد [7].

دان ام شالو و همکاران به تحلیل درخت خطای سرویس در فاز طراحی پرداخته‌اند. با اعمال روش نظارت بر شرایط، مقادیر نرخ‌های شکست تجدیدنظر شده برای عضوهای حساس محاسبه شده و به نمودار درخت خطای سرویس اضافه می‌شود. در این روش با محاسبه دوره‌ای نرخ شکست بالاترین رخداد، احتمال شکست و احتمال عملکرد صحیح سیستم تعیین می‌گردد [8].

یانگ جیانزونگ و همکاران به کاربرد روش تحلیل مارکوف در ارزیابی ایمنی سیستم کنترل پروازی پرداخته و با استفاده از روش تحلیل مارکوف و روش تحلیل درخت خطای سرویس نشان دادند که روش مارکوف دقت بیشتری را در تحلیل کمی رویدادهای ترتیبی دارد [9].

الکساندرو دوینگز گارسیا و همکاران روشی یکپارچه برای تحلیل قابلیت اطمینان و کارایی دینامیک برای سیستم‌های با تحمل‌پذیری خطا و به صورت خاص برای سیستم کنترل پروازی یک هواپیمای جنگنده ارائه دادند که بر مبنای ارزیابی تحلیل دینامیکی پیکربندی‌های مختلف یک سیستم بعد از وقوع شکست عضو است و از زنجیره مارکوف برای مدل‌سازی فرآیند تصادفی استفاده می‌شود [10].

جی مین لو و همکاران روشی مبنی بر تجزیه کل مأموریت به رفتارهای متناظر سیستم و در نهایت به رفتار اجزا و استفاده از زنجیره زمان پیوسته مارکوف جهت مدل‌سازی رفتار شکست و تعمیر هر عضو، برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم مأموریت فازی جامع به همراه عضوهای قابل تعمیر ارائه دادند [11].

کوینگ لین و همکاران مکانیزم جدیدی برای گسترش و قفل سیستم چرخ‌دنده برای فرود آرام کاوشگر ارائه کرده و برای انجام تحلیل‌های کیفی و کمی، مدل درخت خطای سرویس تهیه کرده و از طریق گشتاور استاتیکی و کار آن قابلیت اطمینان را برابر با 0/999334 محاسبه کرده‌اند [12].

کریم برووني روش‌های دیاگرام بلاک قابلیت اطمینان[11] و تحلیل درخت خطای سرویس[12] را برای ارزیابی دسترس‌پذیری و کارایی یک واحد تراوش معکوس[13] در کارخانه تصفیه آب مورد بررسی قرار داد. مقایسه دو روش نشان

1- Fault Tolerant Control System (FTCS)
2- Phased Mission Systems (PMS)
3- Fault Level Coverage (FLC)
4- Multi-valued Decision Diagrams (MDD)
5- System Reliability Assessment (SRA)
6- Bayesian Networks (BNs)

7- Global and Selective Failure Effects
8- Fault-Tolerant Multi-Phased Systems (FTMPS)
9- Cell-to-Cell Mapping Technique
10- Probability Risk Assessment
11- Reliability Block Diagram (RBD)
12- Fault Tree Analysis (FTA)
13- Reverse Osmosis (OR)

داد که روش دیاگرام بلوک قابلیت اطمینان برای ارزیابی دسترس‌پذیری به دلیل امکان مدل‌سازی دقیق پیکربندی‌های پیچیده مناسب‌تر است [13].

جیانگینگ وو و همکاران به منظور یافتن مکانیزم‌های خطای سرویس در آرایه‌های خورشیدی از روش‌های تحلیل درخت خطا و برهان فازی شبکه‌ای پتری[1] استفاده کردند. تحلیل‌ها حاکی از آن هستند که محیط با گرمای نامتعادل و ضربات وارده از طرف ذرات معلق در فضا دلایل عمده و اصلی در خطای سرویس آرایه‌های خورشیدی می‌باشند [14].

در این مقاله به ارائه الگوریتم طراحی برای تمامی سیستم‌ها و زیر سیستم‌های سامانه‌های فضایی بر اساس قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود. با استفاده از این الگوریتم در طراحی به صورت سیستماتیک و استراتژیک به یک طراحی مناسب از لحاظ پارامترهای قابلیت اطمینان می‌توان دست‌یافت. همچنین می‌توان، در مرحله مناسب طراحی را اصلاح نموده و تمهیدات لازم برای جلوگیری و یا کاهش احتمال رخداد حالت شکست در نظر گرفته شود. علاوه بر این رفتار دینامیکی سیستم تعیین شده و پاسخ حالت ماندگار و دائم سیستم با توجه به شرایط اولیه استخراج می‌گردد.

2- تعاریف و مفاهیم

2-1- مفاهیم بنیادی قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان یک سیستم بیانگر توانایی عملکرد یک سیستم یا قطعه تحت شرایط مشخص برای مدت زمان معین است. تعریف دیگری که در توصیف قابلیت اطمینان ارائه گردیده است عبارت است از احتمال ماندن سیستم در شرایط کار رضایت بخش در زمان معین [1]. بنیادی‌ترین مفاهیم قابلیت اطمینان که شامل قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری، نرخ شکست و ظرفیت عملکردی می‌باشند در تعیین احتمال خطر و شدت خطر تأثیر به سزایی دارند [15].

پس قابلیت اطمینان یک مقدار از نوع احتمال و بر اساس زمان است. از این رو کامل‌ترین تعریفی که می‌توان از قابلیت اطمینان ارائه کرد عبارت است از احتمال باقی‌ماندن سیستم در حالت عملکرد رضایت بخش تحت شرایط کار مشخص برای مدت زمان معین؛ اما مفهوم قابلیت اطمینان تا زمانی که مفهوم کامل دسترس‌پذیری مشخص نگردد و این دو مفهوم در کنار یکدیگر قرار نگرفته و باهم مقایسه نشوند قابل درک نمی‌باشد.

دسترس‌پذیری عبارت است از میزان فعال بودن و در حال کار بودن سیستم در یک بازه زمانی مشخص. به عنوان مثال چنانچه دسترس‌پذیری یک سیستم برابر 60 درصد باشد، بدین معنی است که در طول یک مدت زمانی معین 60 درصد مواقع سیستم در حال کار است.

مقدار انتظار یا مقدار میانگین در تابع توزیع احتمال از کار افتادن معمولاً با نام مدت زمان میانگین تا لحظه از کار افتادن یا نرخ شکست شناخته می‌شود که در توزیع نمایی مقدار آن معکوس آهنگ از کار افتادن، λ، می‌باشد [15,1]. پس نرخ شکست به صورت فرکانس از کار افتادگی قطعات و یا یک سیستم در بازه زمانی مشخص تعریف می‌شود که واحد سنجش آن تعداد بر ساعت (معمولاً میلیون ساعت) است. در رابطه با نرخ شکست، برخلاف دو پارامتر قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری که هدف بهبود آن‌ها است، کاهش مقدار آن مطلوب است.

ظرفیت عملکردی سیستم نیز میانگین توان عملیاتی، منفعت و یا سود سیستم است که در ارزیابی قابلیت اطمینان مورد توجه قرار می‌گیرد و هدف از بهبود آن افزایش مقدار آن است. در نهایت هدف از طراحی سیستم با رویکرد قابلیت اطمینان بهبود تمامی این پارامترها و فاکتورهای ارزیابی قابلیت اطمینان است.

1- Fuzzy Reasoning Petri Net (FRPN)

2-2- محور ارزیابی قابلیت اطمینان

به طور کلی دو موضوع اساسی در ارزیابی قابلیت اطمینان مطرح است: یک موضوع تحت عنوان خطر[2] که صرفاً به لحاظ شدت قابل تقسیم‌بندی است و دیگری تحت عنوان احتمال خطر[3] که علاوه بر شدت خطر احتمال وقوع آن را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد [1].

روش ارزیابی قابلیت اطمینان بر محور ارزیابی احتمال خطر استوار است بنابراین به بررسی هر دو موضوع شدت خطر و همچنین احتمال وقوع آن می‌پردازد [15,1]. این شیوه‌ها در تمامی زمینه‌های دیگر نیز که اثرات اجتماعی-اقتصادی دارند به کار گرفته شده‌اند. از جمله صنایع لوازم خانگی، صنایع اتومبیل و نظایر آن‌ها را می‌توان نام برد. پس می‌توان به این نتیجه رسید که امروزه شیوه‌های ارزیابی قابلیت اطمینان طیف گسترده‌ای از رشته-های مهندسی را در برمی‌گیرد و در زمینه‌های مختلف الکتریکی، مکانیکی، شیمیایی و یا ساختمان قابل استفاده می‌باشد.

2-3- سیستم‌های ویژه مأموریت

وجود تنوع سیستم‌ها در عرصه‌های متفاوت موجب پیدایش تنوع شیوه ارزیابی قابلیت اطمینان می‌گردد. به طور کلی دو گروه عمده از سیستم‌ها وجود دارد، سیستم برای انجام مأموریت[4] و سیستم با کار مداوم[5] [1]. ویژگی مهم سیستم‌های ویژه مأموریت آن است که سیستم باید عملکردی بدون هیچ‌گونه نقص و از کار افتادگی در طول مأموریت خود داشته باشد. نکته قابل توجه در این سیستم‌ها آن است که از کار افتادگی اجزای سیستم مشروط بر اینکه بر تداوم عملکردی سیستم خللی وارد نکند و وقفه‌ای در عملکرد درست و کامل سیستم برای مدت کوتاه و معین نداشته باشد، مجاز است [15,1].

3- روش کلی طراحی سیستمی بر اساس قابلیت اطمینان

روش کلی طراحی سیستمی بر اساس قابلیت اطمینان طبق الگوریتم ارائه شده از هفت مرحله اصلی تشکیل یافته است. تمامی این مراحل به هم مربوط بوده و می‌بایست به ترتیب و به دنبال هم طی شوند. در نمودار شکل 1 روند و روش کلی طراحی سیستمی بر اساس قابلیت اطمینان نشان داده شده است.

همان‌طور که در نمودار شکل 1 مشاهده می‌کنیم روند طراحی بر اساس قابلیت اطمینان با تعریف درخت محصول[6] آغاز می‌شود. با مشخص بودن زیرسیستم‌ها و ماژول‌های تشکیل دهنده سیستم و با در دست داشتن نرخ شکست هر ماژول و قطعه، فاکتورها و پارامترهای اساسی قابلیت اطمینان که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد ارزیابی می‌گردد. لازم به ذکر است که مقادیر پارامترهای به‌دست آمده در این مرحله دقیق نمی‌باشند و تنها در حد پیش-بینی اولیه هستند. سپس به کمک تحلیل تأثیر حالت شکست[7]، حالت‌های شکست سیستم را بررسی کرده و عدد اولویت ریسک[8] (احتمال خطر) را محاسبه می‌کنیم. چنانچه عدد به دست آمده برای اولویت ریسک برای یک حالت شکست بیش از 80 شد، می‌بایست تحلیل درخت خطا را انجام دهیم.

2- Hazard
3- Risk
4- Mission Oriented Systems
5- Continuously Operated Systems
6- Tree Item
7- Failure Mode Effect Analysis
8- Risk Priority Number

در این مرحله، از روند رخداد حالت شکست به خوبی آگاه شده و از طریق آن می‌توانیم به راحتی نقاط ضعف طراحی را برطرف نموده و آن را اصلاح کنیم. همچنین در این مرحله مشخص می‌گردد که در چه ماژول‌هایی می‌بایست از قطعات افزونه استفاده کرد.

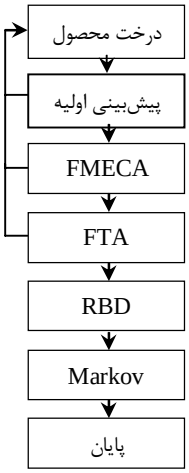
تا این مرحله به طور تقریبی به طراحی بهبود یافته و مورد نظر از سیستم رسیده و قطعات و ماژول‌ها تعیین شده‌اند. در مراحل بعدی می‌بایست پارامترهای ارزیابی قابلیت اطمینان مشخص گردند. برای محاسبه تمامی پارامترهای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم به طور دقیق از تحلیل نمودار بلاک قابلیت اطمینان استفاده می‌کنیم. در مرحله آخر از طریق تحلیل مارکوف[1] نمودار حالت سیستم را رسم نموده و معادلات حالت گذرا و ماندگار سیستم را به دست می‌آوریم و با مقداردهی شرایط اولیه، حالت ماندگار سیستم را به دست می‌آوریم. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده نمودار درخت محصول برای مکانیزم صفحات خورشیدی ماهواره در شکل 2 نشان داده شده است.

3-1- درخت محصول

در ابتدا تیم‌های طراحی می‌بایست لیستی از تمامی ماژول‌ها و قطعات زیر-سیستم‌ها تهیه کنند. درخت محصول شامل تمامی زیرسیستم‌ها به همراه تمامی قطعات و اجزای آن‌ها است. تعریف درخت محصول نقطه شروع طراحی سیستم بر اساس قابلیت اطمینان است و چنانچه به طور مناسب تعریف نشود مراحل طراحی با پیچیدگی روبه‌رو شده و به کندی پیش خواهد رفت. در این مرحله با مشخص شدن ماژول‌ها و قطعات نرخ شکست اجزای تشکیل دهنده نیز مشخص می‌شود.

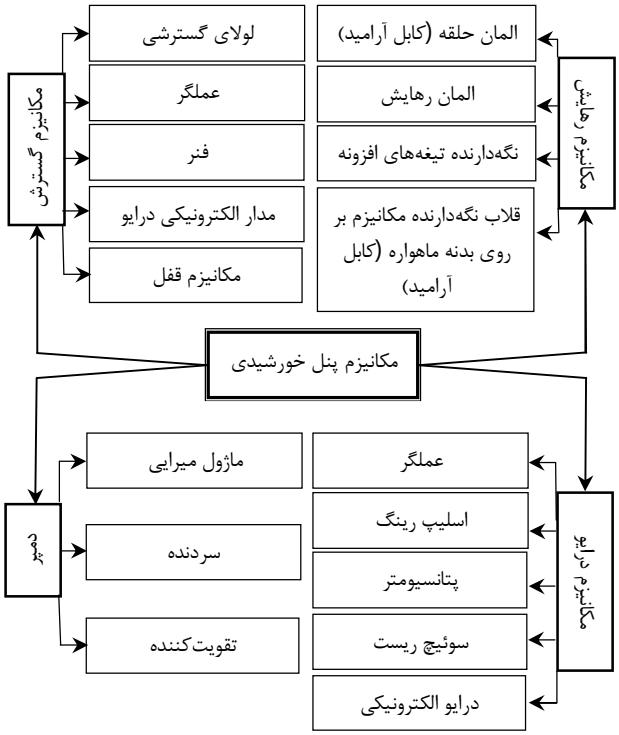
3-2- پیش‌بینی اولیه قابلیت اطمینان λ

پیش‌بینی قابلیت اطمینان یک روش تحلیل کمی است که برای پیش‌بینی اولیه و پایه‌ی قابلیت اطمینان و نرخ شکست سیستم به کار می‌رود [15]. در این تحلیل می‌بایست اطلاعات دقیقی درباره نرخ شکست تمامی اجزای سیستم در دست داشته باشیم. در حقیقت این تحلیل نقطه شروع انجام تحلیل‌های قابلیت اطمینان برای سیستم است. قبلاً توسط درخت محصول سیستم را به همراه تمامی ماژول‌های سازنده آن تعریف کرده‌ایم و نرخ شکست تمامی اجزای تشکیل دهنده مشخص است. تعریف سیستم و ماژول-های آن و تعیین نرخ شکست آن‌ها در این مرحله مهم‌ترین و اساسی‌ترین قسمت است؛ زیرا تمامی تحلیل‌ها و محاسبات دیگر نیز بر پایه این قسمت



شکل 1 نمودار روند و روش طراحی سیستمی با رویکرد قابلیت اطمینان

1- Markov Analysis



شکل 2 نمودار درخت محصول برای مکانیزم صفحات خورشیدی ماهواره

انجام می‌شوند. پس از آن معادله‌های ریاضی و آماری مربوط به سیستم استخراج می‌شود. از روی این معادلات می‌توانیم نرخ شکست کلی سیستم را به دست آوریم. برای به دست آوردن نرخ شکست کلی سیستم می‌بایست نرخ شکست تک‌تک قطعات را با یکدیگر جمع نمود. به عنوان مثال سیستمی را در نظر بگیرید که متشکل از زیر سیستم‌های A و B می‌باشد به‌طوری که زیرسیستم A دارای 5 قطعه که نرخ شکست هر کدام برابر یک شکست در هر میلیون ساعت کارکرد می‌باشد و زیرسیستم B دارای 5 قطعه که نرخ شکست هر یک برابر سه شکست در هر میلیون ساعت کارکرد است بنابراین نرخ شکست زیرسیستم A و B به ترتیب برابر با 5 و 15 شکست در هر میلیون ساعت کارکرد خواهد بود. در نهایت نرخ شکست کل سیستم برابر 20 شکست در هر میلیون ساعت کارکرد است [15].

همان طور که مشاهده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که سادگی طراحی و عدم استفاده از قطعات پیچیده و اضافی چه اندازه در نرخ شکست سیستم مهم است. پس تا حد امکان طراحی می‌بایست ساده و غیر پیچیده بوده و از هر قطعه استفاده‌ی بهینه گردد. پس از انجام محاسبات ممکن است به این نتیجه برسیم که نرخ شکست اولیه سیستم که در این مرحله به دست آمده است، مناسب نیست. در این صورت می‌بایست در درخت محصول تعریف شده بازنگری کلی کرده و برخی از ماژول‌های سیستم را دوباره تعریف کنیم. البته باید توجه داشته باشیم که مفهوم افزونگی را در این قسمت نباید وارد کنیم، زیرا در این قسمت نمی‌توان محاسبات مربوط به سیستم‌های موازی و افزونه را انجام داد. چنانچه ماژول‌های افزونه در محاسبات وارد شوند به عنوان قطعات اصلی در نظر گرفته خواهند شد و به علت افزایش نامربوط تعداد ماژول‌ها نرخ شکست کلی سیستم بالا رفته و قابلیت اطمینان سیستم پایین می‌آید. در صورتی که واقعیت امر این‌گونه نیست.

باز بر این نکته تأکید می‌شود که در این قسمت تنها پیش‌بینی اولیه قابلیت اطمینان انجام می‌شود و این پیش‌بینی ممکن است برای سیستم‌های پیچیده اصلاً هم دقیق نباشد. نکته اصلی در این قسمت تعریف سیستم و

بخش‌های مختلف آن است و تا آخرین مرحله ماژول‌های سیستم ممکن است تغییرات زیادی داشته باشند.

3-3- تحلیل تأثیر حالت شکست

در این مرحله تمامی حالت‌های شکست را قطعه به قطعه و نیز از لحاظ عملکرد بررسی می‌کنیم و عدد اولویت ریسک مربوط به هر یک از قطعات و عملکردهای سیستم را به دست می‌آوریم [16]. در تحلیل عملکرد[1] به بررسی عملکردهای خواسته شده از یک سرویس و یا محصول پرداخته می‌شود و به مشخصات و ویژگی‌های موارد به کار رفته توجهی نمی‌شود. این تحلیل در هر سطحی از عملکرد می‌تواند انجام شود. در این مرحله می‌بایست علاوه بر تمامی حالت‌های شکست، درصد سهم هر حالت از کل حالت‌های شکست، تأثیر محلی رخداد حالت شکست، علت رخداد حالت شکست، راه‌های کنترل حالت شکست و در نهایت گروه مسئول در برابر رخداد شکست نیز مشخص گردد. علاوه بر تمامی پارامترهای گفته شده، به منظور محاسبه عدد اولویت ریسک می‌بایست سه کمیت دیگر نیز مقداردهی شوند. این کمیت‌ها شامل شدت[2]، میزان آشکارپذیری[3] و میزان رخداد[4] می‌باشند.

شدت، یک عدد اختصاصی است که نشان‌دهنده شدت تأثیر حالت شکست خاص است. دامنه تغییر این عدد بین 0 تا 10 بوده و هرچه مقدار آن به 10 نزدیک‌تر باشد شدت تأثیر حالت شکست بر روی سیستم بیشتر خواهد بود. این عدد از طریق آزمایش و به صورت تجربی به دست می‌آید [16].

میزان رخداد نیز از جنس شدت بوده و یک عدد اختصاصی بین 1 تا 10 است و نشان‌دهنده آن است که هر چند وقت یک‌بار این حالت شکست اتفاق می‌افتد. این عدد هرچه بزرگ‌تر باشد نشان‌دهنده تعداد دفعات بیشتر رخداد آن حالت شکست خاص است. این عدد اختصاصی به صورت تجربی و آزمایش‌های مکرری که انجام می‌شود، به دست می‌آید.

برعکس شدت و میزان رخداد، میزان آشکار پذیری که نشان‌دهنده میزان تشخیص اتفاق افتادن حالت شکست است، هرچه به 10 نزدیک‌تر باشد بدین معنی خواهد بود که میزان تشخیص رخداد آن کم‌تر می‌باشد. با مشخص شدن این اعداد، می‌توان از طریق معادله 1 عدد اولویت ریسک را به‌دست آورد [16].

(1) میزان آشکارپذیری × میزان رخداد × شدت = عدد اولویت ریسک

هرگاه عدد اولویت ریسک برای یک حالت شکست بزرگ‌تر از 80 شود، ریسک (احتمال خطر) نسبتاً بالایی دارد. جدول 1 نشان‌دهنده پارامترهای ورودی نرم‌افزار ویندچیل برای تحلیل تأثیر حالت شکست فرآیند رهایش می‌باشند.

برای افزایش قابلیت اطمینان و پایین آوردن احتمال رخداد در چنین حالت شکستی می‌توان تحلیل درخت خطا انجام داد. با انجام تحلیل درخت خطا چنانچه نتوان طراحی را اصلاح نمود و یا تمهیدی برای پایین آوردن احتمال وقوع آن اندیشید، حداقل می‌توان روند رخداد آن حالت شکست را زیر نظر گرفته و به سرعت از رخداد آن مطلع شد.

شکل 3 مقادیر بحرانی را برای عدد اولویت ریسک برای مکانیزم رهایش ماهواره نشان می‌دهد. چنانچه از شکل مشخص است مقدار عددی اولویت ریسک برای حالت 180 بیشتر از مقدار اطمینان آن، 80، می‌باشد؛ بنابراین نیاز است تا برای این حالت تحلیل درخت خطا انجام شود.

1- Functional Analysis
2- Severity
3- Detection
4- Occurrence

3-4- تحلیل درخت خطا

یکی از روش‌های تحلیل، روش رویکرد بالا به پایین و رویدادگرا[5] است. این روش تحلیل بر مبنای یک سری قواعد منطقی است و از قوانین جبر بولی تبعیت می‌کند و به تولید یک مدل منطقی از گیت‌های منطقی منجر می‌شود [17]. برای تحلیل یک حالت شکست از سیستم می‌توان تحلیل درخت خطا انجام داد. در این تحلیل از طریق جبر بولی می‌توان مجموعه‌ای از رویدادهای سطح پایین را باهم به صورت طبقه‌طبقه ترکیب کنیم تا به حالت شکست اصلی برسیم.

ویژگی‌های مهم این تحلیل عبارت‌اند از:

1- درک بهتر منطق رخداد حالت شکست

2- کنترل و مانیتورکردن روند عملکرد مطمئن در سیستم‌های پیچیده

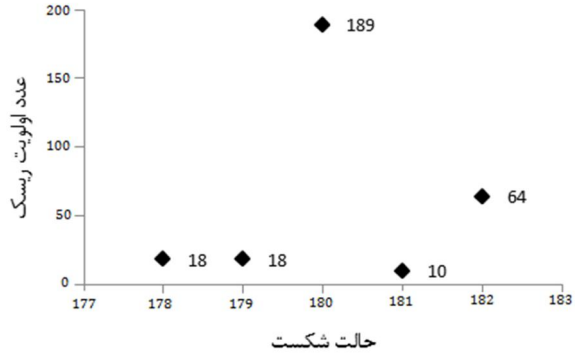
3- یکی از ابزارهای طراحی برای کمک به یافتن الزامات مهم سیستم

در این روش حالت شکست به عنوان بالاترین رخداد[6] در نظر گرفته می‌شود و شرایطی که منجر به رخداد حالت شکست می‌شود، در یک سطح پایین‌تر، از طریق گیت‌های منطقی اضافه می‌شوند. به همین ترتیب باز هم شرایط و دلایلی را که منجر به هر کدام از دلایل رخداد شکست اصلی می‌شوند در یک سطح پایین‌تر اضافه می‌کنیم. این روند تا جایی ادامه دارد که به دلایل پایه برسیم. یکی از مهم‌ترین خروجی‌های این تحلیل کات‌ست[7] کمینه می‌باشد. در این قسمت، یک ترکیب منحصربه‌فرد از شکست قطعات و یا رخدادها که می‌تواند موجب وقوع رویداد نامطلوب شود، مشخص می‌گردد. کات‌ست کمینه مهم‌ترین و بحرانی‌ترین کات‌ست می‌باشد زیرا کوتاه‌ترین کات‌ست متناظر با بیشترین احتمال وقوع است. سپس به ترتیب به بلندترین کات‌ست با کم‌ترین احتمال وقوع می‌رسیم. کات‌ست کمینه مهم‌ترین روند رخداد حالت شکست است که حتماً می‌بایست کنترل شود.

پس از شناخته شدن روند رخداد حالت‌های شکست می‌توان طراحی را به گونه‌ای اصلاح کرد که به طور مثال یک روند رخداد خاص حذف گردد و یا

جدول 1 مقادیر ورودی نرم‌افزار ویندچیل به منظور تحلیل تأثیر حالت شکست برای مکانیزم رهایش

حالت شکست	شدت	میزان رخداد	آشکارپذیری
شکست در رخداد فرمان الکترونیکی	9	1	2
شکست در زیرسیستم الکترونیکی	9	7	3
شکست در عملگر انفجاری	9	1	2



شکل 3 نمودار عدد اولویت ریسک به دست آمده به کمک تحلیل تأثیر حالت شکست برای مکانیزم رهایش

5- Event – Oriented
6- Top Event
7- Minimum Cut Sets

کم‌ترین احتمال رخداد آن به حداقل برسد. در همین قسمت با توجه به نتایج به دست آمده در این قسمت می‌توان تصمیم گرفت که کدامیک از قطعات می‌بایست به طور افزونه به کار روند. در نهایت حتی اگر نتوان هیچ تمهیدی برای برطرف کردن مشکل اندیشید، حداقل با اطلاع از چگونگی روند رخداد حالت شکست، می‌توان آن را زیر نظر گرفت. چنانچه بخواهیم با توجه به اطلاعات به دست آمده تغییری در طراحی بدهیم و یا قطعاتی را اضافه و حذف کنیم می‌بایست دوباره به مرحله درخت محصول بازگشته و تمامی مراحل را تا این قسمت دوباره طی کنیم.

تا این قسمت تقریباً به طور قطعی زیر سیستم‌ها، ماژول‌ها و قطعات مشخص گردیده‌اند و دو مرحله باقی‌مانده دیگر تنها به ارزیابی پارامترهای قابلیت اطمینان و تعیین حالت‌های دینامیک، گذرا و ماندگار سیستم می‌پردازند.

3-5- نمودار بلاک قابلیت اطمینان

نمودارهای بلاک قابلیت اطمینان برای مدل‌کردن سیستم‌هایی به کار می‌روند که شامل ترکیبی از انواع مختلف سیستم‌های سری و موازی می‌باشند. این سیستم‌ها تنها به صورت سری یا موازی نیستند، بلکه ترکیبی از آن‌ها برای محاسبه قابلیت اطمینان در سیستم‌های پیچیده هستند. این روش برای بررسی محاسبات مربوط به سیستم‌های افزونه بسیار مناسب است.

هنگامی که تمامی قطعات یک سیستم به صورت سری باشد، می‌بایست تمامی قطعات به صورت صحیح کار کنند تا سیستم نیز مأموریت را با موفقیت انجام دهد. در صورتی که یکی از قطعات سری شده با شکست مواجه شود، سیستم نیز با شکست مواجه خواهد شد؛ اما در صورتی که برای هر قطعه (حداقل برای قطعات مهم و بحرانی) از قطعه پشتیبان یا موازی (بسته به نوع قطعه و اهمیت کارکرد صحیح آن قطعه) استفاده گردد، در این صورت یک شکست ساده در یک قطعه منجر به شکست سیستم نخواهد شد؛ زیرا قطعه پشتیبان به جای قطعه اصلی موجب کارکرد سیستم خواهد شد [15,1].

به منظور انجام تحلیل نمودار بلاک قابلیت اطمینان برای یک سیستم، بایستی یک مأموریت اصلی و کلی برای آن تعریف کرد. در ادامه کل مأموریت سیستم را به فازهای مختلف تقسیم‌بندی کرده و تحلیل نمودار بلاک قابلیت اطمینان را به طور جداگانه برای هر فاز انجام داد. تا این قسمت پارامترهای قابلیت اطمینان برای هر فاز به طور جداگانه به دست آمده است و می‌توان هر فاز را به صورت یک سیستم واحد که دارای پارامترهای قابلیت اطمینان خاص می‌باشد در نظر گرفت. سپس با در کنار هم قرار دادن هر یک از فازها به صورت سری و رعایت ترتیب و در نظر گرفتن کل سیستم به صورت مجموعه‌ای از این فازها می‌توان قابلیت اطمینان را برای کل سیستم به دست آورد.

3-6- روش مارکوف

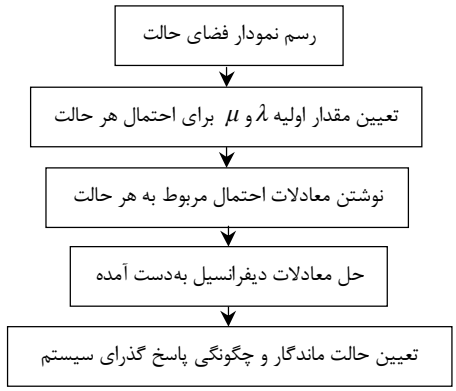
روش‌های تحلیلی متعددی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های تعمیرناپذیر و هم‌چنین سیستم‌های تعمیرپذیر ارائه گردیده است. یکی از روش‌های مهمی که برای این مورد مناسب است و در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است روش مدل‌سازی مارکوف می‌باشد. روش مارکوف در اصل به منظور محاسبه نهایی قابلیت اطمینان سیستم و برای به دست آوردن پاسخ گذرا و ماندگار سیستم در حین تغییر از حالت کارکرد عادی به معیوب و یا برعکس است. روش مارکوف برای مدل‌سازی رفتار اتفاقی سیستم‌هایی کاربرد دارد که به طور پیوسته و یا ناپیوسته نسبت به زمان و یا فضای حالت در تغییرند. این تغییرات پیوسته یا ناپیوسته اتفاقی را اصطلاحاً فرآیند اتفاقی می‌نامند. به طور کلی در مدل مارکوف، هم زمان و هم فضا به شکل پیوسته و یا ناپیوسته قابل تلقی است. در ارزیابی قابلیت اطمینان معمولاً فضا را به عنوان تابع ناپیوسته ارائه می‌کنند زیرا موقعیت مکانی به صورت ناپیوسته، هویت‌پذیر و مشخص کننده محل استقرار برای یک سیستم و اجزای آن است. درحالی‌که زمان، هم به صورت پیوسته و هم ناپیوسته می‌تواند منظور شود. حالت ناپیوسته به عنوان زنجیره مارکوف و حالت پیوسته با عنوان فرآیند مارکوف شناخته می‌شود. اگرچه روش مارکوف در ارتباط با حل مسائل سیستم‌های تعمیرپذیر با مدت تعمیر طولانی مطرح شد ولی از این روش برای ارزیابی سیستم‌های تعمیرناپذیر هم می‌توان استفاده کرد [1].

بنابراین برای امکان‌پذیری کاربرد روش مارکوف کافی است تا الزامات سه‌گانه زیر فراهم باشد [1]:

1- پایداری رفتار سیستم
2- هویت‌پذیری وضعیت و حالت‌های سیستم
3- فقدان حافظه فرآیندهای سیستم.

در این قسمت شیوه بررسی سیستم فرآیندهای ایستای مارکوف توصیف می‌شوند. بدین مفهوم که احتمال شرطی وقوع از کار افتادن آن‌ها برای هر دامنه زمانی (معین) ثابت می‌ماند و رفتار سیستم در مراحل از کار افتادن و تعمیر توسط تابع توزیع نمایی با شیب منفی توصیف می‌شود. شیوه انجام و مراحل روش مارکوف در نمودار شکل 4 آمده است.

نمودار فضای حالت در واقع همان نمودار تغییر حالت سیستم می‌باشد که برای هر سیستم متفاوت است. به کمک نمودار فضای حالت تعداد حالت‌های کارکرد سیستم مشخص می‌شود. در این قسمت دسترس‌پذیری سیستم که همان حالت کارکرد رضایت‌بخش سیستم است مشخص می‌گردد. با داشتن نرخ از کارافتادگی (λ) و نرخ تعمیر شدن (μ) که در حقیقت همان نرخ‌های تغییر حالت یک سیستم از یک وضعیت به وضعیت دیگر می‌باشند، معادلات احتمال وابسته به زمان را برای اتفاق افتادن یک وضعیت به دست می‌آوریم. در این مرحله به یک دستگاه معادلات دیفرانسیل می‌رسیم که تعداد معادلات این دستگاه برابر با تعداد حالات سیستم است. برای حل معادلات دیفرانسیل به دست آمده می‌بایست حالت اولیه هر وضعیت سیستم را در لحظه صفر معلوم کنیم. معمولاً حالت اولیه سیستم را در شرایط کارکرد رضایت‌بخش در نظر می‌گیریم. بدین ترتیب احتمال تمامی وضعیت‌های کارکرد به جز وضعیت کارکرد رضایت‌بخش برابر صفر و تنها احتمال وضعیت



شکل 4 روند انجام روش مارکوف

کارکرد رضایت‌بخش برابر یک است. پس از حل دستگاه معادلات دیفرانسیل و به‌دست آوردن احتمالات وضعیت‌های سیستم وابسته به زمان، به راحتی می‌توان پاسخ گذرا و ماندگار هر یک را مشخص کرد.

در شکل 5 شمایی از فضای حالت برای عضو تعمیرپذیر با نرخ از کار افتادگی و نرخ تعمیرپذیری ثابت نشان داده شده است.

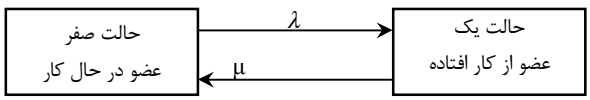
در شکل 6 نمودار فضای حالت با دو نرخ شکست برای یک سیستم مأموریت ویژه نظیر ماهواره نشان داده شده است. تنها وجه اختلاف سیستم‌های ویژه مأموریت در مقایسه با سیستم‌های تعمیرپذیر در این است که حالت گذرای تعمیر و بازیافت در آن‌ها وجود ندارد. بدین ترتیب چون در این سیستم امکان ارتباط میان حالت‌ها وجود ندارد و به عبارتی وجود حالت ماندگار مطرح است بنابراین سیستم دیگر ارگودیک[1] نیست. در این سیستم‌ها برای اجزای حساس و مهم از یک یا چند افزونه استفاده می‌شود. سیستم‌ها بر اساس استفاده از اجزای افزونه به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

- حالت جانشین: در این حالت قطعه یا عضو افزونه در حالت عادی کار نمی‌کند. قطعه جانشین زمانی شروع به کار می‌کند که قطعه اول دچار شکست شده باشد و نقش پشتیبان را برای قطعه اول دارد. مزیت این حالت در این می‌باشد که نرخ شکست کل سیستم کاهش می‌یابد اما مقدار تأخیر زمانی در راه‌اندازی قطعه جانشین بسیار با اهمیت است. به عنوان مثال این حالت بیشتر برای قطعات الکترونیکی اتفاق می‌افتد.
- حالت موازی: در این حالت عضو افزونه حتی در حالت عادی نیز در حال کار است. مزیت این حالت در این است که پس از شکست قطعه اول مقدار زمانی تأخیر برای راه‌اندازی قطعه جانشین وجود ندارد؛ اما در این حالت به علت اینکه قطعه جانشین همواره در حال کار بوده است، نرخ شکست کل سیستم را افزایش می‌دهد.

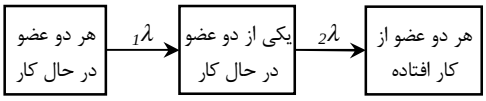
با استفاده از روش مارکوف به راحتی می‌توان رفتارهای دینامیکی سیستم را شناخته و هر یک را بررسی کرد. همچنین با به دست آوردن معادلات احتمال وابسته به زمان تأثیر پارامترهای متفاوت را بر روی پاسخ‌های گذرا و ماندگار سیستم بهتر می‌توان شناخت و حتی با تغییر پارامترهای مهم می‌توان تا حد خوبی پاسخ‌های سیستم را کنترل نمود.

4- نتایج

در این مرحله به نتایج بررسی عملکردی صفحات خورشیدی ماهواره که شامل عملکرد رهایش و عملکرد گسترش است، می‌پردازیم. با توجه به درخت محصول ارائه شده در شکل 2 و تحلیل تأثیر درخت شکست بر روی



شکل 5 فضای حالت عضو تعمیرپذیر



شکل 6 نمودار فضای حالت برای سیستم ویژه مأموریت (تعمیرناپذیر)

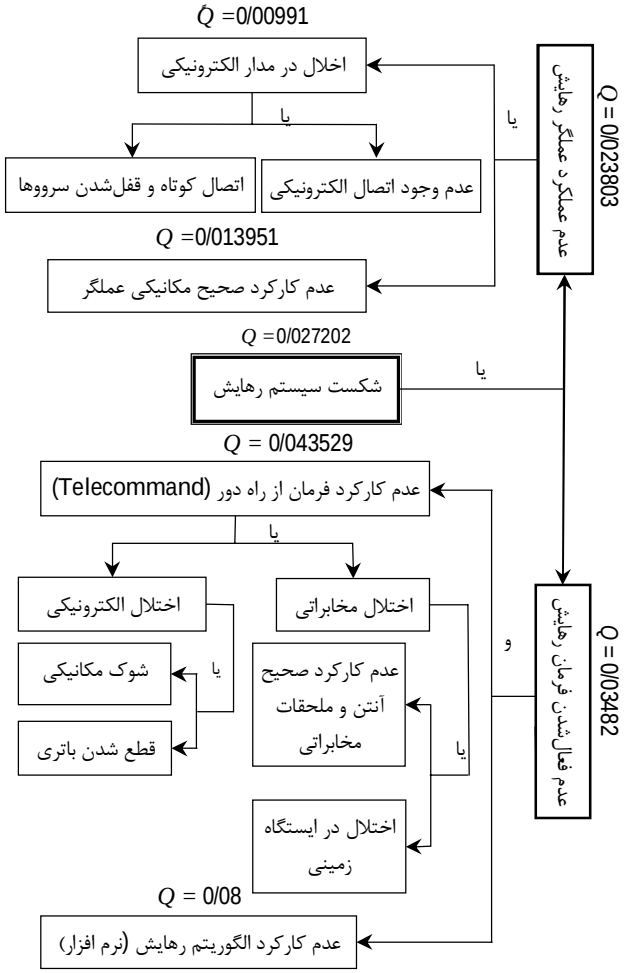
پارامترهای ورودی مشخص می‌شود که عدد اولویت برای حالت شکست 189 بالاتر از 80 است؛ بنابراین نیاز است تا تحلیل درخت خطای محصول را بر روی آن انجام دهیم.

طبق اصول ارائه شده، از روش آنالیز رویدادگرا برای این منظور استفاده خواهیم کرد. از نرم‌افزار ویندچیل برای تعیین کات‌ست‌های کمینه که بیانگر کات‌ست‌های بحرانی با بیش‌ترین احتمال وقوع می‌باشند، استفاده خواهد شد.

4-1- تحلیل درخت خطا برای سیستم رهایش صفحات خورشیدی

دو دلیل اصلی شکست در سیستم رهایش عبارت است از عدم عملکرد عملگر رهایش و عدم فعال شدن فرمان رهایش. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌کنیم، عدم فعال شدن فرمان رهایش زمانی اتفاق می‌افتد که هم الگوریتم رهایش (نرم‌افزار) دچار شکست شود و هم از ایستگاه زمینی از طریق فرمان از راه دور نیز نتوان فرمان رهایش را صادر کرد. با توجه به شکل 7 کات‌ست کمینه مربوط به عدم وجود اتصال الکترونیکی ناشی از اخلال در مدار الکترونیکی است که باعث عدم عملکرد عملگر رهایش می‌شود.

با توجه به تحلیل‌های شکست انجام شده برای سیستم‌ها یکی از دلایل اصلی شکست عدم کارکرد مدار الکتریکی و یا فعال نشدن فرمان الکتریکی است و می‌توان علت آسیب دیدن این اجزا را وارد شدن شوک و ضربات مکانیکی دانست. پس تا جای ممکن می‌بایست ضربات و شوک‌های مکانیکی را با استفاده از دمپرها کاهش داد. در این میان استفاده از عملگرهای انفجاری



شکل 7 نمودار رویدادگرای تحلیل درخت خطا برای سیستم رهایش

1- ergodic

خود یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد شوک و ضربات مکانیکی مخرب برای ادوات الکترونیکی است. هرچند که خود عملگر از نرخ شکست بسیار پایین و قابلیت اطمینان بسیار بالا برخوردار است، اما موجب افزایش نرخ شکست و کاهش قابلیت اطمینان تمامی تجهیزات الکترونیکی می‌گردد.

4-2- تحلیل درخت خطا برای شکست سیستم گسترش پنل خورشیدی

سه دلیل عمده شکست سیستم گسترش عبارت است از: شکست در سیستم رهایش، شکست مکانیزم گسترش و درهم پیچیده‌شدن و گره خوردن کابل‌ها. همان‌طور که در دلایل رخداد شکست در سیستم گسترش مشاهده می‌کنیم، شکست در سیستم رهایش موجب شکست در سیستم گسترش پنل می‌شود. پس می‌توان گفت عملکرد سیستم گسترش مستقل از عملکرد سیستم رهایش نیست.

همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود، کات‌ست کمینه مربوط به سیستم رهایش است و بدان معنی است که سیستم گسترش نه‌تنها به سیستم رهایش بستگی دارد بلکه بحرانی‌ترین، محتمل‌ترین و مهمترین روند رخداد شکست در سیستم گسترش می‌باشد.

4-3- مأموریت صفحات خورشیدی ماهواره

شکل 9 چیدمان پنل خورشیدی ماهواره را نشان می‌دهد. پنل کوچک‌تر در سمت راست، پنل بزرگ‌تر در وسط و یوک در سمت چپ قرار دارد که به وسیله لولا به هم متصل شده‌اند.

این مأموریت متشکل از چهار فاز است:

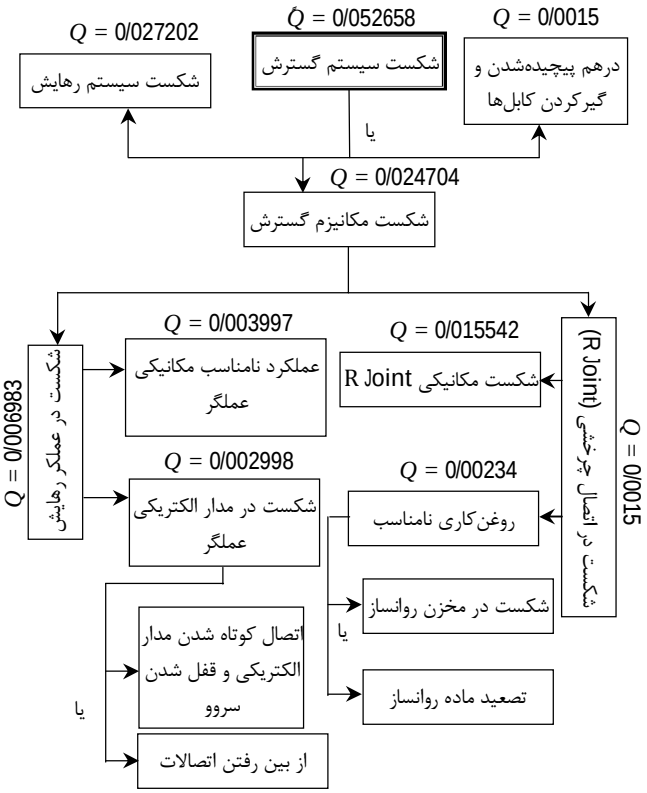
4-3-1- فاز اول: عمل رهایش صفحات

مهم‌ترین تجهیزات در این قسمت عبارت‌اند از:

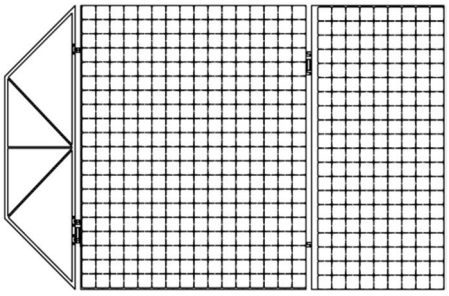
- عملگر (انفجاری، غیر انفجاری)
- مدار الکتریکی فرمان عملگر
- دمپر (برای جذب‌کردن شوک ناشی از رهایش)

در این فاز تجهیزات بحرانی که شکست آن‌ها موجب شکست مجموعه می‌شود، عملگر و مدار الکتریکی فرمان می‌باشد. با توجه به عملگرهای انفجاری موجود در نرم‌افزار ویندچیل بهترین نوع این عملگر دارای نرخ شکست 0/062772 دفعه شکست (در هر میلیون ساعت کارکرد) است که نرخ شکست مناسبی بوده و نیازی به عملگر انفجاری پشتیبان نیست. طی بررسی‌های انجام شده معمولاً علت شکست عمل نکردن مدار الکترونیکی فرمان عملگر بوده است [12]. به همین دلیل از مدار فرمان عملگر پشتیبان از نوع افزونه جانشین یا یدک استفاده شده است. مدار فرمان عملگر که به صورت افزونه استفاده شده است دارای نرخ شکست 0/7 می‌باشد. بلاک دیاگرام طراحی شده برای این فاز در گزارش تولید شده توسط خود برنامه ویندچیل آورده شده است.

در شکل 10 نمودارهای قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری برای این فاز رسم شده است. مشاهده می‌شود که قابلیت اطمینان سیستم در مدت‌زمان 30000 ساعت کارکرد، بالاتر از 0/98 به دست آمده است که بر اساس تحلیل مارکوف این مقدار قابل‌قبول بوده و بیانگر باقی‌ماندن سیستم در همان حالت بعد از مدت زمان 30000 ساعت کارکرد است. لازم به ذکر است در صورتی که این فاز با شکست مواجه شود کل مأموریت با شکست مواجه می‌شود و این امر نشان‌دهنده اهمیت این فاز می‌باشد.



شکل 8 نمودار رویدادگرای تحلیل درخت خطا برای سیستم گسترش

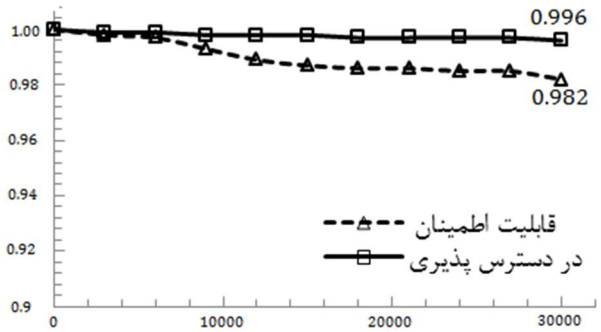


شکل 9 چیدمان پنل خورشیدی ماهواره

4-3-2- فاز دوم: گسترش‌یافتن پنل شماره دو (پنل کوچک)

مهم‌ترین تجهیزات در این قسمت عبارت‌اند از:

- اتصال لولایی بین دو پنل کوچک و بزرگ
- سروو موتور به‌کاررفته برای چرخاندن اتصال لولایی بین دو پنل
- مدار الکتریکی که از طریق آن فرمان سروو تولید می‌شود.



شکل 10 نمودار قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری برای فاز یک

نرخ شکست اتصال لولایی، مدار الکتریکی فرمان سروو و موتور به‌کار رفته در این فاز به ترتیب برابر با 0/75، 0/07 و 0/252326دفعه شکست (در هر میلیون ساعت کارکرد) است. به دلیل بالا بودن نسبی نرخ شکست سروو و جبران آن سعی بر آن شده است تا مدار الکتریکی فرمان دهنده سروو دارای نرخ شکست پایین‌تری باشد. مانند فاز قبلی مدار الکتریکی فرمان افزونه از نوع یدک و پشتیبان است. اتصال لولایی به علت خاصیت ذاتی مکانیکی خود می‌بایست به طور موازی به‌کار رود. بلاک دیاگرام طراحی شده برای این فاز در گزارش تولید شده توسط نرم‌افزار ویندچیل آورده شده است.

شکل 11 نشان‌دهنده نمودارهای قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری برای فاز دو می‌باشد. مشاهده می‌شود که عدد دسترس پذیری سیستم در مدت زمان 30000 ساعت کارکرد، بالاتر از 0/96 به دست آمده است که بر اساس تحلیل مارکوف، احتمال استقرار سیستم در حالت هردو عضو در حال کار است. قابلیت اطمینان سیستم برای این فاز در مدت زمان 30000 ساعت کارکرد بالاتر از 0/95 به دست آمده است و احتمال باقی ماندن سیستم در همان حالت را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است چنانچه این فاز با شکست مواجه شود قسمتی از انرژی تولیدی را از دست خواهیم داد اما مأموریت با شکست کامل مواجه نخواهد شد.

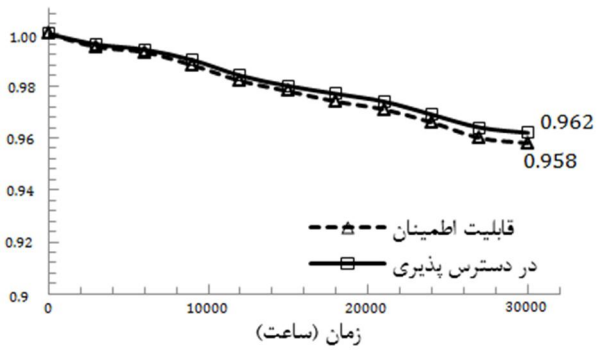
3-3-4- فاز سوم: گسترش یافتن پنل شماره یک (پنل بزرگ)

مهم‌ترین تجهیزات در این قسمت عبارت‌اند از:

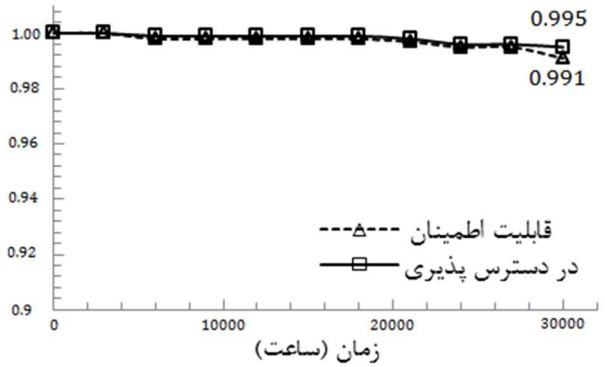
- اتصال لولایی بین دو پنل بزرگ و کوچک
- سروو موتور به‌کار رفته برای چرخاندن اتصال لولایی بین دو پنل
- مدار الکتریکی که از طریق آن فرمان سروو تولید می‌شود.

نرخ شکست اتصال لولایی، مدار الکتریکی فرمان سروو و موتور سروو به‌کار رفته در این فاز به‌ترتیب برابر با 1/423025، 0/08 و 2/171732 دفعه شکست (در هر میلیون ساعت کارکرد) است. از آن جا که این پنل تأمین کننده قسمت اعظم انرژی می‌باشد این فاز بحرانی بوده و می‌بایست پارامترهای دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان بالایی داشته باشد. به‌همین علت تمامی تجهیزات مهم ذکرشده همگی به صورت افزونه به‌کار رفته‌اند. اتصالات لولایی به صورت افزونه موازی، سروو و مدار الکتریکی فرمان به‌صورت افزونه جانشین یا یدک به‌کار می‌روند. بلاک دیاگرام طراحی شده برای این فاز در گزارش تولید شده توسط نرم‌افزار ویندچیل آورده شده است.

شکل 12 نمودارهای قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری را برای فاز سه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دسترس پذیری سیستم در مدت زمان 30000 ساعت کارکرد، بالاتر از 0/99 به دست آمده است که بر اساس تحلیل مارکوف، احتمال استقرار سیستم در حالت هردو عضو در حال کار است.



شکل 11 نمودار قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری برای فاز دو



شکل 12 نمودار قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری برای فاز سه

قابلیت اطمینان سیستم برای این فاز در مدت زمان 30000 ساعت کارکرد بالاتر از 0/99 به دست آمده است و احتمال باقی‌ماندن سیستم در همان حالت را نشان می‌دهد.

نتایج به دست آمده از تحلیل نمودارها برای فاز سوم کاملا قابل قبول است. لازم به ذکر است که اگر این فاز با شکست مواجه شود، به علت بزرگ بودن پنل شماره یک، قسمت اعظمی از انرژی تولیدی از دست خواهد رفت و ممکن است با شکست کامل سیستم روبه‌رو شویم.

4-3-4- فاز چهارم: گسترش یافتن یوک

در این فاز مهم‌ترین تجهیزات عبارت‌اند از:

- اتصال لولایی بین یوک و پنل شماره یک
- مدار الکتریکی که از طریق آن فرمان سروو تولید می‌شود.
- سروو موتور به‌کار رفته برای چرخاندن اتصال لولایی یوک و پنل شماره یک

نرخ شکست اتصال لولایی، مدار الکتریکی فرمان سروو و موتور سروو به‌کار رفته در این فاز به ترتیب برابر با 0/75، 0/07 و 0/252326 دفعه شکست (در هر میلیون ساعت کارکرد) است. به دلیل بالا بودن نسبی نرخ شکست سروو و جبران آن سعی بر آن شده است تا مدار الکتریکی فرمان دهنده سروو دارای نرخ شکست پایین‌تری باشد؛ مانند فاز قبلی مدار الکتریکی فرمان افزونه از نوع یدک و پشتیبان می‌باشد. اتصال لولایی به علت خاصیت ذاتی مکانیکی خود می‌بایست به طور موازی به‌کار رود. بلاک دیاگرام طراحی شده برای این فاز در گزارش تولید شده توسط نرم‌افزار ویندچیل آورده شده است.

همان‌طور که شکل 13 مشاهده می‌کنیم، دسترس پذیری سیستم در مدت زمان 30000 ساعت کارکرد، بالاتر از 0/96 به دست آمده است که بر اساس تحلیل مارکوف، احتمال استقرار سیستم در حالت هردو عضو در حال کار می‌باشد. قابلیت اطمینان سیستم برای این فاز در مدت زمان 30000 ساعت کارکرد بالاتر از 0/95 به‌دست آمده است و احتمال باقی‌ماندن سیستم در همان حالت را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از تحلیل نمودارها برای فاز سوم کاملا قابل قبول است.

بعد از بررسی قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری برای تک‌تک هر کدام از فازهای چهارگانه به بررسی قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری کلی سیستم صفحات خورشیدی می‌پردازیم. نمودارهابراساس داده‌های به دست آمده از نرم‌افزار ویندچیل رسم شده‌اند. با توجه به شکل 14 مشخص می‌شود دسترس‌پذیری کلی سیستم در مدت زمان 30000 ساعت کارکرد، بالاتر از 0/98 به دست آمده است که بر اساس تحلیل مارکوف، احتمال استقرار کل سیستم در حالت هردو عضو در حال کار می‌باشد. قابلیت اطمینان کلی

سیستم در مدت زمان 30000 ساعت کارکرد بالاتر از 0/97 به دست آمده است و احتمال باقی‌ماندن سیستم در همان حالت را نشان می‌دهد.

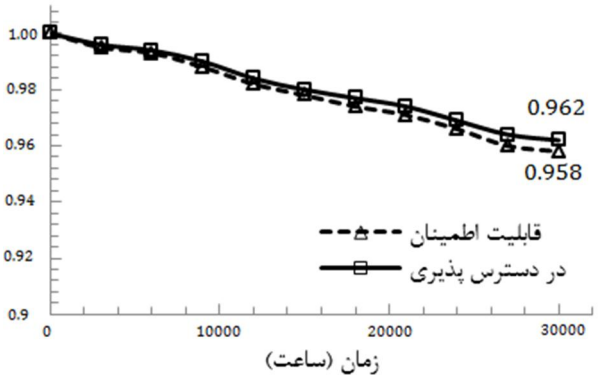
4-4- نتایج حاصل از تحلیل مارکوف برای سیستم مأموریت ویژه

با در نظر گرفتن سیستمی با نمودار فضای حالت مطابق شکل 6 به بررسی تأثیر مقدار نرخ شکست بر روی پارامترهای مهم می‌پردازیم. در این قسمت ابتدا با تغییر محدوده‌های نرخ‌های شکست λ_1 و λ_2 به صورتی که در جدول 2 آمده است و با استفاده از تحلیل‌های ریاضی انجام شده توسط نرم‌افزار ویندچیل به بررسی تغییرات پارامترهای مهم مانند دسترس‌پذیری، قابلیت اطمینان، ظرفیت عملکردی برای مدت زمان معلوم 0 تا 30000 ساعت می‌پردازیم. پس از آن به بررسی تغییر این پارامترهای مهم در نقطه زمانی 30000 ساعت می‌پردازیم. در این حالت میزان تأثیر نرخ شکست را در نقطه زمانی 30000 بر روی پارامترهای مهم مشاهده می‌کنیم.

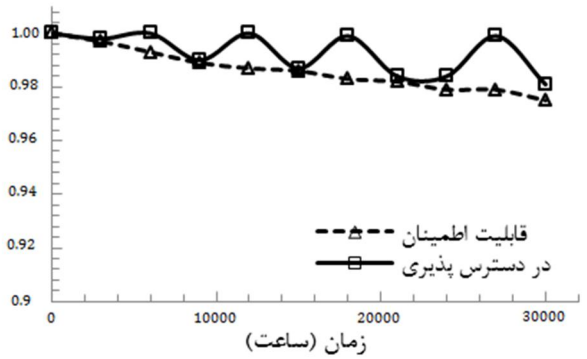
4-4-1-تأثیر نرخ شکست اجزای افزونه بر روی پارامتر دسترس‌پذیر کل سیستم

همان‌گونه که در شکل 15 دیده می‌شود تغییر محدوده‌های نرخ شکست λ_1 و λ_2 تأثیر به سزایی بر روی پارامتر دسترس‌پذیری دارد. مهم‌ترین نکات در تأثیر محدوده‌های نرخ شکست دسترس‌پذیری را می‌توان این‌گونه بیان کرد:

- با کاهش نرخ شکست میزان دسترس‌پذیری سیستم افزایش می‌یابد. حالت 5 بیش‌ترین دسترس‌پذیری را دارد.
- در مراحل 1، 2 و 3 با تغییر محدوده نرخ شکست تغییرات قابل‌توجهی را در نمودار دسترس‌پذیری مشاهده می‌کنیم؛ اما در مرحله‌های 4 و 5 با تغییر محدوده نرخ شکست تغییر قابل‌توجهی در نمودار ایجاد نمی‌شود.



شکل 13 نمودار قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری برای فاز چهار



شکل 14 نمودار قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری کلی سیستم

- در محدوده‌های نرخ شکست بالاتر (حالت‌های 1 و 2) در ابتدا دسترس‌پذیری سیستم دچار سقوط ناگهانی می‌شود و با کاهش محدوده نرخ شکست، شدت سقوط نیز کاهش پیدا می‌کند و در حالت‌های 4 و 5 - دسترس‌پذیری سیستم به حالت پایداری در طول زمان کارکرد خود می‌رسد.

4-4-2-تأثیر نرخ شکست اجزای افزونه بر روی پارامتر قابلیت اطمینان کل سیستم

همان‌گونه که در شکل 16 دیده می‌شود تغییر محدوده‌های نرخ شکست λ_1 و λ_2 تأثیر به‌سزایی بر روی پارامتر قابلیت اطمینان دارد. مهم‌ترین نکات در تأثیر محدوده‌های نرخ شکست در قابلیت اطمینان را می‌توان گونه بیان کرد:

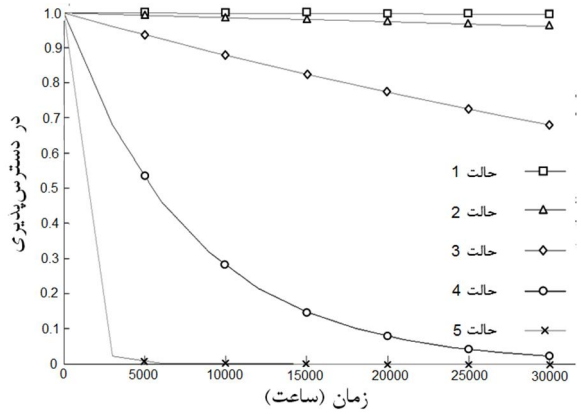
- با کاهش نرخ شکست قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد.
- در حالت‌های 1، 2 و 3 با تغییر محدوده نرخ شکست تغییرات قابل‌توجهی را در نمودار قابلیت اطمینان مشاهده می‌کنیم؛ اما در مرحله‌های 4 و 5 با تغییر محدوده نرخ شکست تغییر قابل‌توجهی در نمودار ایجاد نمی‌شود.
- در محدوده‌های نرخ شکست بالاتر (حالت‌های 1 و 2) در ابتدا قابلیت اطمینان سیستم دچار سقوط ناگهانی می‌شود و با کاهش محدوده نرخ شکست، شدت سقوط نیز کاهش پیدا می‌کند و در حالت‌های 4 و 5 قابلیت اطمینان سیستم به حالت پایداری در طول زمان کارکرد خود می‌رسد.

4-4-3-تأثیر نرخ شکست اجزای افزونه بر روی پارامترظرفیت عملکرد کل سیستم

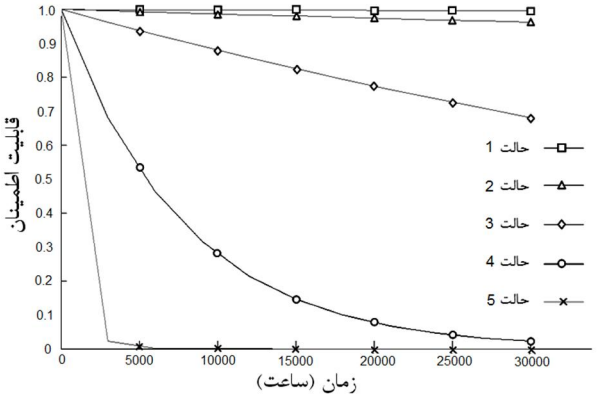
با توجه به شکل 17 سه نکته مهم در چگونگی تأثیر تغییر محدوده نرخ‌های شکست λ_1 و λ_2 بر روی پارامتر ظرفیت عملکرد وجود دارد:

جدول 2 نرخ‌های شکست در نظر گرفته شده برای کل سیستم

حالت	λ_1	λ_2
1	$1/28\times10^{-3}$	$2/56\times10^{-3}$
2	$1/28\times10^{-4}$	$2/56\times10^{-4}$
3	$1/28\times10^{-5}$	$2/56\times10^{-5}$
4	$1/28\times10^{-6}$	$2/56\times10^{-6}$
5	$1/28\times10^{-7}$	$2/56\times10^{-7}$



شکل 15 نمودار دسترس‌پذیری برای نرخ شکست‌های متفاوت اجزای افزونه



شکل 16 نمودار قابلیت اطمینان برای نرخ شکست‌های متفاوت اجزای افزونه

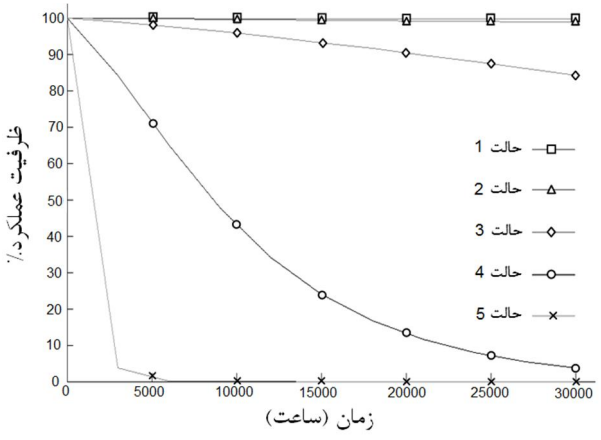
- با کاهش نرخ شکست میزان ظرفیت عملکرد سیستم افزایش می‌یابد.
- در حالت‌های 1، 2 و 3 با تغییر نرخ شکست تغییرات قابل‌توجهی را در نمودار ظرفیت عملکرد مشاهده می‌کنیم اما در حالت‌های 4 و 5 با تغییر محدوده نرخ شکست تغییر قابل‌توجهی در نمودار ایجاد نمی‌شود.
- در محدوده‌های نرخ شکست بالاتر (حالت‌های 1 و 2) در ابتدا ظرفیت عملکرد سیستم دچار سقوط ناگهانی می‌شود و با کاهش محدوده نرخ شکست، شدت سقوط نیز کاهش پیدا می‌کند و در مراحل 4 و 5 ظرفیت عملکرد سیستم به حالت پایداری در طول زمان کارکرد خود می‌رسد.

4-4-4- دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان در زمان 30000 ساعت کارکرد

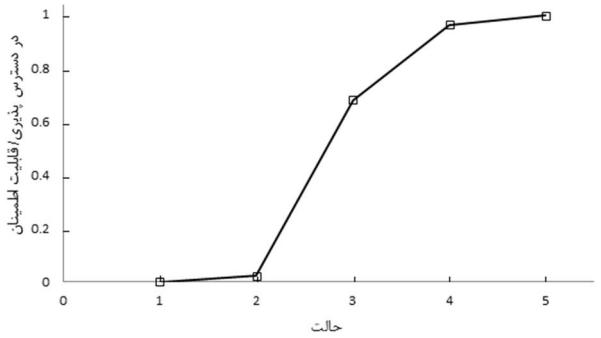
با توجه به شکل 18 برای حالت‌های 1 و 2 دسترس‌پذیری و همچنین قابلیت اطمینان تقریباً برابر صفر است. درحالی‌که این پارامترها در زمان 30000 ساعت کارکرد برای حالت‌های 4 و 5 به‌طور تقریبی نزدیک به یک است و اختلاف بسیار زیادی بین حالت‌های 2 و 3 همچنین بین حالت 3 و 4 مشاهده می‌شود.

4-4-5- ظرفیت عملکرد در نقطه زمانی 30000 ساعت کارکرد

با توجه به شکل 19 برای حالت‌های 1 و 2 ظرفیت عملکرد تقریباً برابر صفر است. درحالی‌که این پارامتر در زمان 30000 ساعت کارکرد برای حالت‌های 4 و 5 بسیار نزدیک به صد می‌باشد و اختلاف بسیار زیادی بین حالت‌های 2 و 3 وجود دارد.



شکل 17 نمودار ظرفیت عملکرد برای نرخ شکست‌های متفاوت اجزای افزونه



شکل 18 نمودار دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان برای نقطه زمانی 30000 ساعت کارکرد

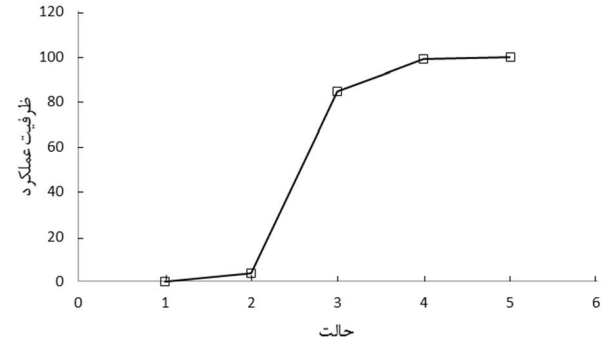
4-4-6- نرخ شکست کلی سیستم در نقطه زمانی 30000 ساعت کارکرد

نمودار نرخ شکست کلی سیستم در نقطه زمانی 30000 ساعت کارکرد مطابق شکل 20 می‌باشد که در مقیاس لگاریتمی رسم‌شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با کاهش محدوده نرخ شکست، نرخ شکست کلی سیستم نیز کاهش می‌یابد؛ اما برای حالات شکست 1، 2 و 3 نرخ شکست بسیار بالا بوده و با افزایش محدوده نرخ شکست به صورت توانی و با شیب زیاد بیشتر می‌گردد.

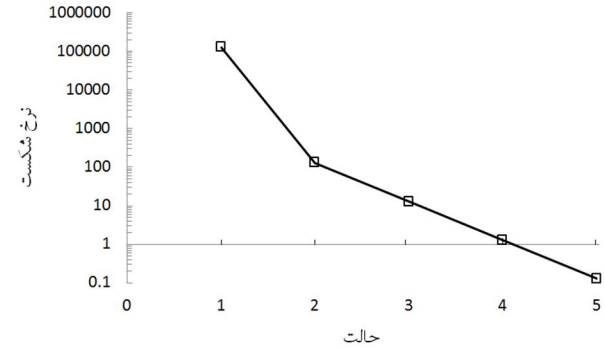
5- نتیجه‌گیری و بحث

سیستم مورد بررسی در این مقاله مکانیزم پنل خورشیدی ماهواره است. به دلیل آن‌که پس از پرتاب و استقرار ماهواره در مدار مورد نظر دیگر امکان دستیابی به ماهواره و تعمیر آن وجود ندارد بنابراین سیستم مورد بررسی یک سیستم ویژه مأموریت است.

این سیستم شرایط لازم سه‌گانه مربوط به شرایط مورد نیاز برای آنالیز



شکل 19 نمودار ظرفیت عملکرد برای نقطه زمانی 30000 ساعت کارکرد



شکل 20 نرخ شکست کلی سیستم در نقطه زمانی 30000 ساعت کارکرد

مارکوف از جمله سکون رفتار سیستم، فقدان حافظه فرآیندهای سیستم و هویت‌پذیری وضعیت و حالت‌های سیستم را دارا می‌باشد.

در قسمت تحلیل پیش‌بینی، سکون رفتار سیستم اثبات‌شده و مشخص شد که احتمال شرطی وقوع از کار افتادن عضوها برای هر دامنه زمانی معین (که در این پژوهش 30000 ساعت است) ثابت می‌ماند. این امر بدان معنی است که رفتار سیستم هنگام از کار افتادن توسط تابع توزیع نمایی با شیب منفی توصیف می‌شود.

در رابطه با سیستم‌های ویژه مأموریت (سیستم‌های تعمیرناپذیر) در حالت ماندگار احتمال یکی از حالت‌ها برابر یک و بقیه برابر صفر است. حالتی از فضای حالت را که احتمال رخداد آن برابر یک است، حالت نهایی یا ماندگار می‌نامند.

هنگام استفاده از قطعات افزونه در طراحی می‌بایست دقت کرد که در جای مناسب از قطعات جانشین یا یدک و یا از قطعات پشتیبان استفاده کرد.

در حد امکان، با توجه به مزایای قطعات جانشین یا یدک نسبت به قطعات افزونه موازی، بهتر است از قطعات افزونه جانشین یا یدک استفاده‌کرد.

رفتار صعود و نزول پارامترهای دسترس‌پذیری، قابلیت اطمینان و ظرفیت عملکردی، بسیار شبیه به هم است.

برای بهبود پارامترهای قابلیت اطمینان می‌بایست از اجزای دارای نرخ شکست بسیار پایین استفاده کرد. البته همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، کارکرد هر یک از این اجزاء در یک بازه زمانی معین مهم می‌باشند.

پارامترهای قابلیت اطمینان برای قطعات و عضوهای انتخابی بایستی با در نظر گرفتن مدت زمان کارکرد آن‌ها انتخاب شوند.

6- منابع

[1] R. N. A. Roy Billinton, Reliability Evaluation of Engineering Systems *Concepts and Techniques*: Springer US, 1992.
[2] H. L. Q. Zhao, Reliability evaluation of fault tolerant control systems with a semi-Markov FDI model, *@IFAC Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Vol. Volume # 6 | Part# 1, pp. 1306-1311, 2006.
[3] R. Peng, Q. Zhai, L. Xing, J. Yang, Reliability of demand-based phased-mission systems subject to fault level coverage, *Reliability Engineering & System Safety,* Vol. 121, No. 0, pp. 18-25, 1//, 2014.
[4] X. Zhong, M. Ichchou, A. Saidi, Reliability assessment of complex mechatronic systems using a modified nonparametric belief propagation algorithm, *Reliability Engineering & System Safety,* Vol. 95, No. 11, pp. 1174-1185, 11//, 2010.
[5] C. Wang, L. Xing, G. Levitin, Propagated failure analysis for non-repairable systems considering both global and selective effects, *Reliability Engineering & System Safety,* Vol. 99, No. 0, pp. 96-104, 3//, 2012.
[6] Y.-c. Mo, D. Siewiorek, X.-z. Yang, Mission reliability analysis of fault-tolerant multiple-phased systems, *Reliability Engineering & System Safety,* Vol. 93, No. 7, pp. 1036-1046, 7//, 2008.
[7] P. Bucci, J. Kirschenbaum, L. A. Mangan, T. Aldemir, C. Smith, T. Wood, Construction of event-tree/fault-tree models from a Markov approach to dynamic system reliability, *Reliability Engineering & System Safety,* Vol. 93, No. 11, pp. 1616-1627, 11//, 2008.
[8] D. M. Shalev, J. Tiran, Condition-based fault tree analysis (CBFTA): A new method for improved fault tree analysis (FTA), reliability and safety calculations, *Reliability Engineering & System Safety,* Vol. 92, No. 9, pp. 1231-1241, 9//, 2007.
[9] Y. Jianzhong, Z. Julian, Application Research of Markov in Flight Control System Safety Analysis, *Procedia Engineering,* Vol. 17, No. 0, pp. 515-520, //, 2011.
[10] A. D. Domínguez-García, J. G. Kassakian, J. E. Schindall, J. J. Zinchuk, An integrated methodology for the dynamic performance and reliability evaluation of fault-tolerant systems, *Reliability Engineering & System Safety,* Vol. 93, No. 11, pp. 1628-1649, 11//, 2008.
[11] J.-M. Lu, X.-Y. Wu, Reliability evaluation of generalized phased-mission systems with repairable components, *Reliability Engineering & System Safety,* Vol. 121, No. 0, pp. 136-145, 1//, 2014.
[12] Q. Lin, H. Nie, J. Ren, J. Chen, Investigation on design and reliability analysis of a new deployable and lockable mechanism, *Acta Astronautica,* Vol. 73, No. 0, pp. 183-192, 4//, 2012.
[13] K. Bourouni, Availability assessment of a reverse osmosis plant: Comparison between Reliability Block Diagram and Fault Tree Analysis Methods, *Desalination,* Vol. 313, No. 0, pp. 66-76, 3/15/, 2013.
[14] W. Jianing, Y. Shaoze, Modeling of the failure principle of complex mechanical systems by using Timed Places Petri nets, in *Proceeding of*, 66-70.
[15] P. D. T. O'Connor, P. O'Connor, A. Kleyner, *Practical Reliability Engineering*: Wiley, 2012.
[16] D. H. Stamatis, *Failure Mode and Effect Analysis: Fmea from Theory to Execution*: American Society for Quality, 2003.
[17] D. J. Mahar, J. W. Wilbur, R. A. Center, *Fault Tree Analysis Application Guide*: The Center, 1990.