

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم چند حالتی بر مبنای آنالیز درخت خطا

محمدعلی فارسی^{۱*}، محمد نجفی^۲

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشکده سامانه‌های فضانوردي، پژوهشگاه فضایي ايران، تهران

۲- دانشجوی دکтри، مهندسی هواپا، پژوهشکده سامانه‌های فضانوردي، پژوهشگاه فضایي اiran، تهران

*تهران، صندوق پستي ۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱، farsi@ari.ac.ir

چکیده

در این مقاله، آنالیز قابلیت اطمینان سیستم منسجم چند حالتی تشخیص شرایط اضطراری یک فضاییما براساس آنالیز درخت خطا مورد بررسی قرار گرفته است. این سیستم دارای پیچیدگی بالا و ترم‌های اشتراکی بسیاری است که تحلیل چنین سیستمی چه به روش حداقل مجموعه-برش و چه با استفاده از روش BDD بسیار زمان بر و دارای تحلیل بسیار مشکلی به لحاظ ترم‌های اشتراکی بوده و همچنین تابع بدست آمده از دقت مناسب برخوردار نخواهد بود. برای غلبه بر این مشکل، در این مقاله یک روش ترکیبی برای تحلیل درخت خطا استاتیکی توسعه داده شده است. در این روش، حداقل مجموعه-برش با روش BDD ادغام شده و احتمال رخداد رویداد اصلی مورد محاسبه قرار می‌گیرد. برای بیان کامل این روش، از مثال سیستم تشخیص شرایط اضطراری (EDS) یک فضاییما استفاده می‌گردد. در اینجا، آنالیز سیستم از یک دیدگاه کلی تر صورت می‌گیرد. به این معنی که فرض می‌شود کل سیستم شامل دو زیرسیستم؛ زیرسیستم مربوط به فرستنده‌های سیگنال و زیرسیستم نشانده‌های داخل کابین می‌باشد. دو درخت خطا متقاوت برای هر یک از حالت‌ها ساخته شده و در نهایت، تابعی از گام‌های آنالیز برای سیستم چند حالتی مشکل از اجزاء چند حالتی به کمک آنالیز درخت خطا ارائه شده و مقدار قابلیت اطمینان سیستم محاسبه شده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۱ تیر ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۰ آبان ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۱۸ آذر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

قابلیت اطمینان

آنالیز درخت خطا

سیستم چند حالتی

مجموعه-برش

دیاگرام تصمیم‌پذیری

Reliability Estimation of Multi-State System Based On Fault Tree Analysis

Mohammad Ali Farsi^{1*}, Mohammad Najafi²

1- Mechanical Engineering, Astronautic Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

2- Aerospace Engineering, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

*P.O.B. 1465774111 Tehran, Iran, farsi@ari.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 02 July 2014

Accepted 11 November 2014

Available Online 09 December 2014

Keywords:

Reliability Assessment

Fault Tree Analysis

Multi-State System

Cut-Set

Binary Decision Diagram

ABSTRACT

In this paper, the reliability assessment based-on fault tree analysis in coherent multi-state emergency detection system in a sounding rocket is evaluated. A system was built with more complexity and containing various intersection terms. Analysis of such system whether by means of minimal cut-set or binary decision diagram (BDD) approaches requires complex analysis and will be time consuming owing to intersection terms. Also, the gained results have less accuracy and contain uncertainty. To overcome these problems a combinatorial method for solving static fault tree is used. This method combines minimal cut-set with BDD, and then computes the occurrence probability of top-event in fault tree. To fully demonstrate this method Emergency Detection system (EDS) is used as a case-study. Here, system analysis is done from a general approach. So assume that the overall system consists of two sub-systems: sending signal sub-system and cabin instrumental sub-system. Two different fault trees, one for each, are constructed and conclusions of analysis steps for multi-state systems consisting of multi-state elements are presented using fault tree analysis. Finally, by means of this method, the reliability assessed value of the system is estimated.

-1 مقدمه

یکی از مسائل بسیار مهم در تئوری قابلیت اطمینان، درک این است که چگونه قابلیت اطمینان یک سیستم پیچیده را از اطلاعات مربوط به اجزاء آن بدست آورد. یکی از ضعف‌های اساسی تئوری قابلیت اطمینان باینری این است که سیستم و اجزاء همیشه فقط از دو دیدگاه موفقیت یا شکست تشریح می‌گردد [۱]. تحلیل قابلیت اطمینان دقیق رویداد اصلی یک درخت خطا با اجزاء چند حالتی (بیشتر از دو حالت) را ارزیابی می‌کند، نشان می‌دهد که برای تشریح صحیح یک سیستم با چند حالت، یک نوع خاصی از جبر بولی

لازم می‌باشد. که این را اصطلاحاً "جبر بولی با محدودیت در متغیرها" نامیده و قوانین پایه‌ای آن همانند جبر بولی معمولی به همراه چند محدودیت مازاد در متغیرها می‌باشد [۲]. با این حال، برای بسیاری از سیستم‌ها، مدل قابلیت اطمینان حالت - باینری از نظر ارزیابی سیستم کافی نیست. برای مثال، شبکه‌ها و اجزاء آنها وظایف خود را در سطوح مختلفی از عملکرد انجام می‌دهند. از این‌رو، لازم است که کاهش عملکرد شبکه به دلیل شکست نسبی اجزای آن در طول زمان عملیات مورد برسی قرار گیرد [۳]. برای سیستم با شبکه منسجم یا همسان چند حالت، یک طیف گسترده برای شبکه‌های چند بعدی با اجزاء باینری مورد استفاده قرار گرفته و روابط ریاضی برای ارتباط

$$\begin{aligned} x_{li} \cap x_{lj} &= \emptyset \\ i \in (0, 1, \dots, M_l) \quad i &\neq j \\ j \in (0, 1, \dots, M_l) \end{aligned} \quad (2)$$

در ادامه، مراحل آنالیز این روش تشریح می‌گردد.

2-1 ساخت درخت خطا

برای ساخت درخت خطا ابتدا رویداد اصلی سیستم شناسایی می‌شود و پس از انتخاب رویداد اصلی، تمام مدهای خرابی اجزاء سیستم به عنوان رویدادهای اولیه اتخاذ می‌گردد. روابط منطقی بین رویداد اصلی و رویدادهای پایه‌ای و اولیه آنالیز می‌گردد؛ سپس درخت خطا مربوط به رخدادن رویداد اصلی تشکیل می‌گردد.

2-2 ساده‌سازی FTA و بدست آوردن مجموعه شکست حداقلی به منظور ساده‌سازی درخت خطا، از یک الگوریتم اختیاری توسعه یافته برای بدست آوردن حداقل مجموعه-برش برای سیستم و اجزاء دوخته و با پیاده‌سازی بررسی انحصاری با رابطه 2، که بتواند "حداقل مجموعه-برش واقعی" را تعیین کند (مفهوم "حداقل مجموعه-برش" در اصل در سیستم‌های همسان استفاده می‌گردد). استفاده می‌گردد. و سپس با استفاده از رابطه احتمال اجتماع رویدادها (رابطه 3)، احتمال رخداد رویداد اصلی محاسبه می‌گردد. از تابع ساختار مجموع احتمالات برای رویداد اصلی داریم [2]:

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^k Y_i \quad (3)$$

در رابطه فوق، Y_i نامین حداقل مجموعه-برش و k مجموع تعداد حداقل مجموعه-برش‌های تابع ساختار می‌باشد. از این‌رو، رابطه 4 را برای احتمال رویداد اصلی داریم:

$$P_{TOP} = \sum_{i=1}^k P(Y_i) - \underbrace{\sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} P(Y_i Y_j)}_{\text{ترمهای اشتراکی}} + (-1)^{n-1} P(Y_1 \dots Y_k) \quad (4)$$

زمانی که رابطه 4 محاسبه می‌گردد، رابطه 5 باید مورد استفاده قرار گیرد.

$$P(x_{li}) = \alpha_{li} F_l \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^{M_l} \alpha_{li} = 1$$

$P(x_{li})$: احتمال رخداد نامین مد خرابی جزء / می‌باشد. α_{li} : ضریب مد نامین مد خرابی جزء / F_l : احتمال خرابی جزء / می‌باشد. برای مثال، سیستم تشخیص شرایط اضطراری (EDS³) یک فضایی‌پرداز (EDS³) که به صورت "توماتیک" بر وضعیت اجزاء و متعلقات فضایی‌پرداز نظرتداشت و در شرایط بحرانی، سیگنال‌های هشدار و فرمان پرتاب سیستم فرار فضایی‌پرداز را صادر می‌کند [9]. راهنمایی خودکار درصورتی وارد عمل می‌شود که یکی از حالت‌های: ازدست دادن نیروی پیشران اصلی، وارد شدن نرخ‌های زاویه‌ای بسیار زیاد به وسیله، و سیگنال ایجاد الکتریکی تشخیص داده شود [10]. دیاگرام ساده‌سازی شده برای EDS در شکل 1 نشان داده شده است. با توجه به شکل 1، رویداد اصلی این‌طور تعریف می‌شود که سیستم قادر به تشخیص و انتقال سیگنال‌ها از بخش‌های مربوطه (از دست رفتن نیروی پیشران، خرابی الکتریکی، و نرخ‌های زاویه‌ای بالا) به نشانه‌گذار داخل

بین طیف‌های تجمعی و تعداد خرابی‌های سیستم توسعه یافته است [4]. روش آنالیز درخت خطا (FTA) ابزاری قدرتمند برای آنالیز قابلیت اطمینان یک سیستم پیچیده می‌باشد. اما روش سنتی و معمولی FTA فرض دو حالت را قبول می‌کند یعنی، فرض اینکه سیستم و اجزاء هر دو موفق عمل می‌کنند یا دچار خرابی و شکست می‌شوند. با این حال، در دنیای واقعی، سیستم و متعلقات دارای چندین حالت خرابی (با مدهای خرابی) می‌باشند. برای مثال، سیگنال خرابی قطعه/ یا اجزائی که توسط یک ردیاب یا آشکارساز به سیستم تشخیص شرایط اضطراری یک فضایی‌پرداز می‌شود، ممکن است به دلیل اتصال-کوتاه در مدار یا ناشی از قطع مدار باشد. علاوه، هر قطعه و هر سیستمی که فقط یک مد خرابی دارد، ممکن است دارای حالت‌های مختلفی از شکست و کارکرد باشد [5]. بدیهی است که روش‌های سنتی FTA قادر به تشریح خواص مختلفی از دنیای واقعی نمی‌باشند، و توسعه یک روشی برای بررسی سیستم‌ها و اجزاء چند حالتی بسیار ضروری و لازم می‌باشد. مسئله آنالیز سیستم‌های چند حالتی در دهه‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است، و مفهوم توسعه یافته سیستم منسجم به اجزاء چند حالتی با معرفی یک مجموعه مرتبی از مقادیر برای هر اجزاء صورت گرفته است [7,6]. و در ادامه، توسعه یافته همان مفهوم با یک منطق غیر-ترتیبی صورت گرفت [8]. در این مقاله، روشی از FTA را به عمومی‌ترین حالت سیستم که در آن هم سیستم و هم اجزاء دارای حالت‌های خرابی متعدد و چند حالتی می‌باشند توسعه داده شده است. بطور گسترده سه رویکرد کمی برای آنالیز درخت خطا سیستم‌های پیچیده وجود دارد: روش‌های بر بنای فضای حالت، روش‌های ترکیبی، و روش‌های مدولار (ترکیبی از دو روش فوق) که بیشتر برای درخت‌های خطا دینامیکی کاربرد دارند. برای آنالیز کمی سیستمی با پیچیدگی بالا و ترم‌های اشتراکی بسیار، تحلیل سیستم چه به روش مجموعه (مسیر) شکست حداقلی و چه با استفاده از روش دیاگرام تصمیم‌باینری بسیار زمان بر و دارای تحلیل بسیار مشکلی به لحاظ ترم‌های اشتراکی بوده و همچنین نتایج بدست آمده از دقت کمتری برخوردار خواهد بود [5]. بر همین اساس و برای غلبه بر این مشکلات، در این مقاله برای تحلیل درخت خطا استانیکی سیستم مورد نظر از روش ترکیبی به کمک مجموعه (مسیر) شکست حداقلی با روش دیاگرام تصمیم‌باینری (BDD²) استفاده خواهد شد و احتمال رخداد رویداد اصلی محاسبه گردیده و در نهایت قابلیت اطمینان سیستم ارزیابی خواهد شد.

2- روش درخت خطا مناسب برای اجزاء چند حالتی

آنالیز درخت خطا برای اجزاء چند حالتی به طور مبسوط در مرجع [5] برای سیستم‌های همسان مورد بررسی قرار گرفته است. از این‌رو، در این مقاله، ابتدا نتایج اصلی آنها معرفی گردیده و سپس، این روش برای سیستم غیره همسان موردنظر توسعه داده خواهد شد. فرض کیم که جزء / دارای مدهای خرابی M_l باشد، و Ω_l فضای حالت آن باشد، که Ω_l شامل $1 + M_l$ رویداد پایه‌ای می‌باشد (رابطه 1). در این صورت:

$$\Omega_l = (x_{li}, i \in (0, 1, \dots, M_l)) \quad (1)$$

که x_{li} : حالت نرمال جزء l ، و $(1, M_l)$: نامین حالت خرابی جزء l می‌باشد. همچنین فرض می‌کنیم که هر جزء سیستم مستقل از هم می‌باشد و احتمال رخداد هر مد خرابی برابر صفر نباشد. بدیهی است که هر دو حالت یک جزء از سیستم، دو به دو ناسازگار خواهد بود (رابطه 2). یعنی،

$$P(x_{41}) = \alpha_{41}F(x_{41}) = 0.8(0.01) = 0.008$$

$$P(x_{42}) = \alpha_{42}F(x_{42}) = 0.2(0.01) = 0.002$$

در این صورت، اگر فرض شود که رویدادها دوبهدو ناسازگار باشند، فقط

ترم اول رابطه ۴ برای محاسبه P_{TOP} مورد استفاده قرار گرفته و مقدار زیر برای P_{TOP} بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} P_{TOP} &= \sum_{i=1}^k P(Y_i) = P(X_1, X_2, X_3) + P(X_1, X_2, X_{41}) \\ &\quad + P(X_1, X_2, X_{42}) + P(X_1, X_{41}, X_3) \\ &\quad + P(X_1, X_{42}, X_3) + P(X_{41}, X_2, X_3) \\ &\quad + P(X_2, X_3, X_{42}) + P(X_{41}, X_{42}) \\ &= (0.8 + 0.32 + 0.08 + 0.32 + 0.08 \\ &\quad + 0.32 + 0.08 + 0.0256) \times 10^{-5} \\ &= 2.0256 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

و اگر فرض شود که رویدادها دوبهدو مشترک باشند، طبق رابطه ۴ مقدار زیر برای P_{TOP} بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} P_{TOP} &= \sum_{i=1}^k P(Y_i) - \underbrace{\sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} P(Y_i Y_j)}_{\text{ترم‌های اشتراکی}} + \sum_{i=3}^k \sum_{j=2}^{i-1} \sum_{n=1}^{j-1} P(Y_i Y_j Y_n) \\ &\quad \left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k P(Y_i) = (2.0256 \times 10^{-5}) \\ \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} P(Y_i Y_j) = (1.5680 \times 10^{-5}) \\ \sum_{i=3}^k \sum_{j=2}^{i-1} \sum_{n=1}^{j-1} P(Y_i Y_j Y_n) = (0.6097 \times 10^{-5}) \end{array} \right. \text{ترم 56} \\ &\Rightarrow P_{TOP} = [(2.0256) - (1.5680) + (0.6097)] \times 10^{-5} \\ &= 1.0673 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

نوع خرابی و مقادیر مربوط به احتمال وقوع هر خرابی برای زیرسیستم‌های تشخیص شرایط اضطراری در جدول ۱ آورده شده است.
برای نمایش ارتباط بین اجزاء و المان‌های سیستم تشخیص شرایط اضطراری می‌توان از مدل‌سازی رویدادهای گسترهای شبکه‌ای نیز استفاده کرد.
همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است شبکه مربوطه دارای ۷ گره و ۱۱ لینک (انتقال بین حالت‌ها) می‌باشد.

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، سیستم چند حالتی منسجم در برخی از مراجع موردن بررسی قرار گرفته است [۱۵-۱۱]. اما، همیشه شرایط نرمال برای هر یک از اجزاء در درخت خطا اتفاق نمی‌افتد. لذا برای توسعه این حالت به درخت خطا سیستم چند حالتی منسجم، باید انجام شود. اختلاف بین این دو حالت در این است که، نه تنها هر مد خرابی از اجزاء باید در نظر گرفته شود بلکه به همان اندازه، حالت نرمال آنها همانند رویداد پایه‌ای

جدول ۱ نوع خرابی و احتمال وقوع ایراد در زیرسیستم‌های

		نوع خرابی		احتمال وقوع خرابی	ضرایب مدها
α_{i2}	α_{i1}	داتن	نیروی پیشران اصلی		
1	1	0/02	نیروی پاره‌دان		
1	1	0/02	نیروی واردشدن نرخ‌های زاویه‌ای بسیار زیاد		
1	1	0/02	نیروی ایراد الکتریکی		
0/2	0/8	0/01	خرابی کنتاکتور		

ماژول خدمه نباشد (به عبارت دیگر، نشانده‌نده EDSI) هیچ هشداری را نشان ندهد). درخت خطا مربوط به این سیستم در شکل ۲ نمایش داده شده است.

رویدادهای پایه‌ای سیستم عبارتند از x_1 : سیگنال خرابی مربوط به از دست دادن نیروی پیشران، x_2 : سیگنال خرابی مربوط به خرابی الکتریکی، x_3 : سیگنال خرابی مربوط به نرخ زاویه‌ای بالا برای کل سیستم، x_{41} : خرابی سوئیچ الکتریکی (کنتاکتور) که در حالت-بالا بسته شود، و x_{42} : خرابی کنتاکتور که در حالت-پائین بسته بماند. براساس درخت خطا شکل ۲ مجموعه (مسیر) شکست حداقلی طبق روابط زیر عبارتند از:

$$C(1): Y_1 = (X_1, X_2, X_3)$$

$$C(2): Y_2 = (X_1, X_2, X_{41})$$

$$C(3): Y_3 = (X_1, X_2, X_{42})$$

$$C(4): Y_4 = (X_1, X_{41}, X_3)$$

$$C(5): Y_5 = (X_1, X_{42}, X_3)$$

$$C(6): Y_6 = (X_{41}, X_2, X_3)$$

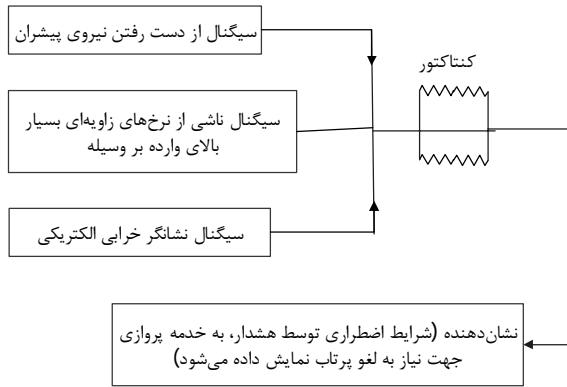
$$C(7): Y_7 = (X_2, X_3, X_{42})$$

$$C(8): Y_8 = (X_{41}, X_{42})$$

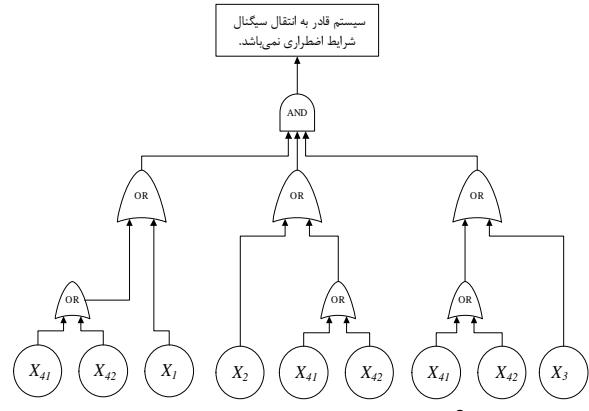
فرض کنید که احتمال خرابی هر یک از بخش‌های از دست رفتن نیروی پیشران، خرابی الکتریکی، و نرخ‌های زاویه‌ای بالا در حین پرواز فضای پیما، برابر ۰/۰۲ باشد. یعنی، $P(x_1) = P(x_2) = P(x_3) = 0.02$. $P(x_{41}) = P(x_{42}) = 0.01$ باشد. همچنین ضریب حالت برای نمین حالت خرابی جزء چهارم، مقدار زیر باشد.

$$\begin{cases} \alpha_{41} = 0.8 \\ \alpha_{42} = 0.2 \end{cases} \Rightarrow \sum_{i=1}^{M_l} \alpha_{li} = 1$$

مقادیر (Y_1) و (Y_2) از رابطه ۵ قابل محاسبه می‌باشد.



شکل ۱ دیاگرام ساده‌سازی شده برای سیستم تشخیص شرایط اضطراری



شکل ۲ درخت خطا سیستم تشخیص شرایط اضطراری

در این مرحله، دو روش ممکن است مورد استفاده قرار گیرد:

1. تعریف حالت‌های خرابی سیستم بر طبق مأموریت‌ها یا پیدایش خرابی سیستم صورت گیرد. برای مثال، یک هوابیمی مأموریتی برای شناسایی بمب‌افکن، و رهگیری طراحی شده باشد، در این صورت می‌توان سه حالت خرابی: نقص در مأموریت شناسایی، نقص در مأموریت بمب‌افکن، و نقص در مأموریت رهگیری را برای هوابیما تعریف کرد. یکی از شکل‌های قابل توجه این نوع تعریف این است که حالت‌های خرابی سیستم اغلب رویدادهای اشتراکی هستند، همان‌طور که در شکل 4 نمایش داده شده است.
2. تعریف حالت‌های خرابی سیستم بر طبق درجه فرسودگی سیستم صورت گیرد. برای مثال، می‌توان حالت‌های خرابی سیستم را همانند خرابی‌های سبک، معمولی و سنگین تعریف کرد؛ یکی از شکل‌های قابل توجه این نوع تعریف این است که حالت‌های خرابی سیستم اغلب رویدادهای دوبه‌دو ناسازگار هستند، همان‌طور که در شکل 5 نمایش داده شده است.

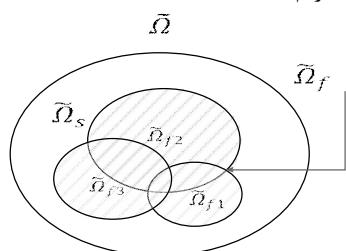
گام دوم از آنالیز یک سیستم چند حالتی به کمک درخت خطای، انتخاب تمام حالت‌های مختلف خرابی سیستم به عنوان رویدادهای اصلی می‌باشد. سپس درخت خطای بر مبنای رویدادهای اصلی ساخته می‌شود. پس از انجام این مرحله، آن را ساده کرده و احتمال رخداد هر رویداد اصلی براساس روش اشاره شده در بخش 2- محاسبه می‌گردد.

قضایای زیر برخی از خواص بسیار مفید در مورد درخت‌های خطای سیستم‌های چند حالتی را بیان می‌کنند [5].

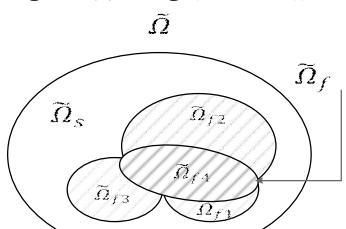
قضیه 1. اجازه دهید a و b $(TOP)_a$ و $(TOP)_b$ نشانگر دو رویداد اصلی متعلق به همان فضای $\tilde{\Omega}$ باشند. و φ_a نشانگرتابع ساختار a ، و φ_b نشانگرتابع ساختار b باشند. اجازه دهید Y_{al} دلیل اصلی φ_a ، $l \in (1, \dots, a_n)$ ، که a_n تعداد کل دلایل عمدۀ φ_a باشد. و اجازه دهید Y_{bm} عمدۀ دلیل φ_b باشد که b_n تعداد کل دلایل عمدۀ φ_b باشد. سپس، شرط کافی و لازم که باعث می‌شود رویدادهای اصلی a و b دوبه‌دو ناسازگار باشند عبارت است از:

$$Y_{al} \cap Y_{bm} = \emptyset \quad l \in (1, \dots, a_n) \quad m \in (1, \dots, b_n) \quad (15)$$

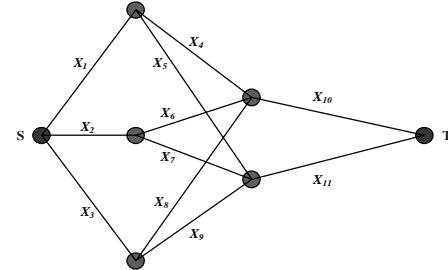
برای اثبات این قضیه داریم



شکل 4 رویدادهای اشتراکی سیستم چند حالتی



شکل 5 سیستم چند حالتی با رویدادهای انحصاری



$$N_{p(\tilde{\Omega}_{fmax})} = 2^{(\prod_{i=1}^n(1+M_i)-1)} \quad (29)$$

بنابراین
با کم کردن مجموعه تهی از رابطه 29، داریم:

$N_{TOP_{max}} = 2^{(\prod_{i=1}^n(1+M_i)-1)} - 1$

نتیجه 2. اگر سیستمی متشكل از n جزء باشد که اجزاء آن تنها دو حالت دارند (موقعیت یا شکست)، در این صورت

$$N_{p(\tilde{\Omega}_{fmax})} = 2^{(2^n-1)} \quad (30)$$

برای اثبات این حالت، هر جزئی فقط یک مد خرابی دارد، یعنی
 $M_l = 1 \text{ for all } l$ (31)

با جاگذاری این رابطه، در رابطه 22 و 30 خواهیم داشت:

$$N_{TOP_{max}} = 2^{(2^n-1)} - 1$$

نتیجه 3. اگر حالت‌های خرابی یک سیستم رویدادهای دوبدهو ناسازگار باشند، مجموع تعداد رویدادهای اصلی که ممکن است انتخاب شود عبارت است از:

$$N_{TOP} = N_{\tilde{\Omega}_f} \quad (32)$$

برای اثبات این موضوع، با توجه به این حقیقت که رویداد پایه‌ای از یک فضای حالت یک المان بسیار پایه‌ای می‌باشد، و تمام رویدادهای پایه‌ای دوبه دو ناسازگار هستند، صحت این نتیجه واضح و روشن است. از قضایا و نتایج فرعی پیداست که تعریف حالت خرابی یک سیستم ممکن است بسیار انعطاف‌پذیر باشد. به زبان تئوری، روش فوق‌الذکر ممکن است برای آنالیز هر سیستم چند حالتی فارغ از اینکه چه ساختار پیچیده‌ای داشته باشد و چه تعداد حالت‌های خرابی ممکن است اتفاق بیافتد مورد استفاده قرار گیرد.

4- درخت خطای منسجم برای سیستم چند حالتی

درخت خطای همسان (CFT1) به همراه گیت‌های منطقی که در درخت‌های خطای منسجم بکار گرفته می‌شود، مشخص می‌گردد. این درخت ممکن است شامل سیستم k -out-of- n باشد [16]. علاوه بر این، سیستم‌های غیرهمسان اغلب برای آنالیز دقیق رویدادهای گستته [17]، رویدادهای و استه [18]، و درخت‌های رویداد استفاده قرار می‌گیرند [19]. تابع ساختار سیستم غیرمنسجم با افزایش تعداد اجزاء عملیاتی، دارای روند افزایشی یکنواختی نمی‌باشد. سیستم‌های غیرمنسجم بطور رایج در سیستم‌هایی با منابع محدود، چند مأموریتی و سیستم‌هایی با کاربردهای در حوزه اینمی مورد استفاده قرار می‌گیرند [20]. برای مثال، در سیستم تشخیص شرایط اضطراری به منظور دریافت سیگنال از هر یک از زیرسیستم‌های اساسی، می‌توان از سیستم k -to- l -out-of- n برای تشخیص ایجاد در هر یک از سه بخش فرستنده سیگنال (نیروی پیشران اصلی، وارد شدن نرخ‌های زاویه‌ای بسیار زیاد به وسیله، و سیگنال ایجاد الکتریکی) استفاده کرد. که n : تعداد کل سنسورها (در این مورد فرض می‌شود که $n=3$) برای شناسایی ایجاد در هر یک از بخش‌ها، و $l=k=2$: تعداد سنسور لازم برای شناسایی ایجاد باشند. ساختار این سیستم در شکل 6 آورده شده است.

اگر کمتر از حد معین K سنسور مورد استفاده قرار گیرد، سیستم در بهترین حالت نبوده و سیگنال فرستنده نخواهد شد؛ از سوی دیگر، اگر تعداد سنسورها بیشتر از K باشد، مشکلی در فرآیند شناسایی ایجاد نداشته و نشانگر بروز حتمی ایجاد در بخش مربوطه می‌باشد. در تحلیل درخت خطای این سیستم، عدم فرستادن سیگنال می‌تواند ناشی از دو حالت: یا اینکه هیچ سیگنالی که نشانگر ایجاد باشد وجود ندارد، و یا اینکه حداقل دو سنسور

$$\varphi_a = \bigcup_{\substack{i=1 \\ b_n}}^{a_n} Y_{al} \quad (16)$$

$$\varphi_b = \bigcup_{m=1}^{b_n} Y_{bm} \quad (17)$$

داریم

$$\begin{aligned} (\text{TOP})_a \cap (\text{TOP})_b &= \varphi_a \cap \varphi_b \\ &= \left(\bigcup_{\substack{i=1 \\ a_n}}^{a_n} Y_{al} \right) \cap \left(\bigcup_{m=1}^{b_n} Y_{bm} \right) \\ &= \bigcup_{i=1}^{a_n} \bigcup_{m=1}^{b_n} (Y_{al} \cap Y_{bm}) \end{aligned} \quad (18)$$

با توجه به روابط 15 و 18 داریم

$$(\text{TOP})_a \cap (\text{TOP})_b = \varphi_a \cap \varphi_b = \emptyset \quad (19)$$

اگر اشتراکی وجود داشته باشد:

$$Y_{ai} \cap Y_{bi} \neq \emptyset \quad (20)$$

پس، از رابطه 18 داریم

$$(\text{TOP})_a \cap (\text{TOP})_b = Y_{ai} \cap Y_{bi} \neq \emptyset \quad (21)$$

این رابطه در تضاد با رابطه 19 بوده و در نتیجه:

نتیجه 1. در یک سیستم منسجم که اجزاء آن تنها دو حالت دارند، رویدادهای اصلی مختلف آن همیشه رویدادهای مشترک می‌باشند. صحت این نتیجه کاملاً آشکار است. در این سیستم‌ها، هر دلیل اصلی (حداقل مجموعه-برش) از هر رویداد اصلی شامل حالت خرابی اجزاء بوده، سپس، تمام مجموعه‌های-برش بطور متقابل مشترک می‌باشند. بنابراین، نمی‌توان از درخت خطای منسجم معمولی برای آنالیز سیستم‌های چند حالتی که حالت‌های خرابی دوبدهو ناسازگار می‌باشند استفاده کرد.

قضیه 2. فرض کنید سیستمی متشكل از n جزء باشد، و جزء l شامل M_l مد خرابی باشد، $(1, \dots, n) \in \mathbb{N}$. سپس، در طی آنالیز، حداقل تعداد رویدادهای اصلی که ممکن است انتخاب شوند عبارت است از

$$N_{TOP_{max}} = 2^{(\prod_{i=1}^n(1+M_i)-1)} - 1 \quad (22)$$

برای اثبات این قضیه از رابطه 8 استفاده می‌شود. و برای هر سیستم، رویدادهای پایه‌ای عبارتند از:

$$X_{s0} = (X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0}) \quad (23)$$

که همیشه باعث می‌شود سیستم موفق عمل کند. برای تشریح این موضوع سیستم ساده‌ای موردی بررسی قرار می‌گیرد که دارای ساختار سری می‌باشد و هر جزء و مد خرابی متفاوت باشند، سپس تمام رویدادهای پایه‌ای، X_{s0} (که در این حالت سیستم دچار خرابی شده است) مورد بررسی قرار می‌گیرد. یعنی

$$\tilde{\Omega}_{s_{min}} = (X_{s0}) \quad (24)$$

$$\tilde{\Omega}_{f_{max}} = (X \mid X \in \tilde{\Omega}, X \neq X_{s0}) \quad (25)$$

سپس

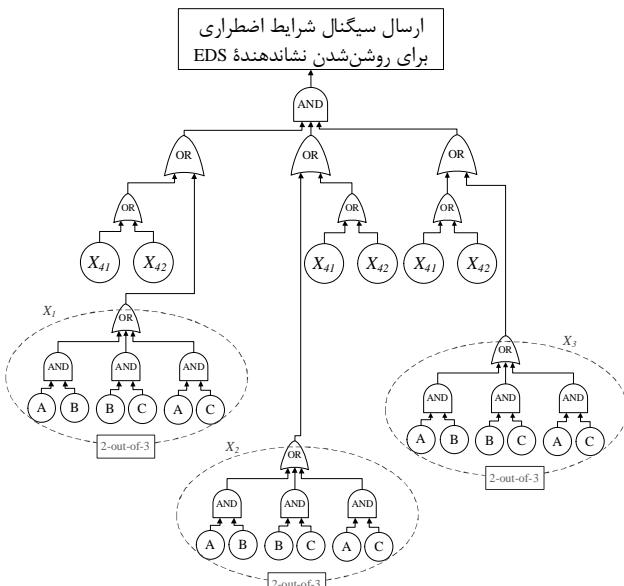
$$N_{\tilde{\Omega}_{f_{max}}} = N_{\tilde{\Omega}} - 1 = \prod_{i=1}^n (1 + M_i) - 1 \quad (26)$$

فرض کنید $(\tilde{\Omega}_f)$ نشاندهنده فضای حالت کلی برای $\tilde{\Omega}_f$ باشد. المان‌های فضای $(\tilde{\Omega}_f)$ همگی زیرفضاهایی از فضای $\tilde{\Omega}_f$ می‌باشند. یعنی

$$p(\tilde{\Omega}_f) = (\tilde{\Omega}_{f_i} \mid \tilde{\Omega}_{f_i} \subset \tilde{\Omega}_f) \quad (27)$$

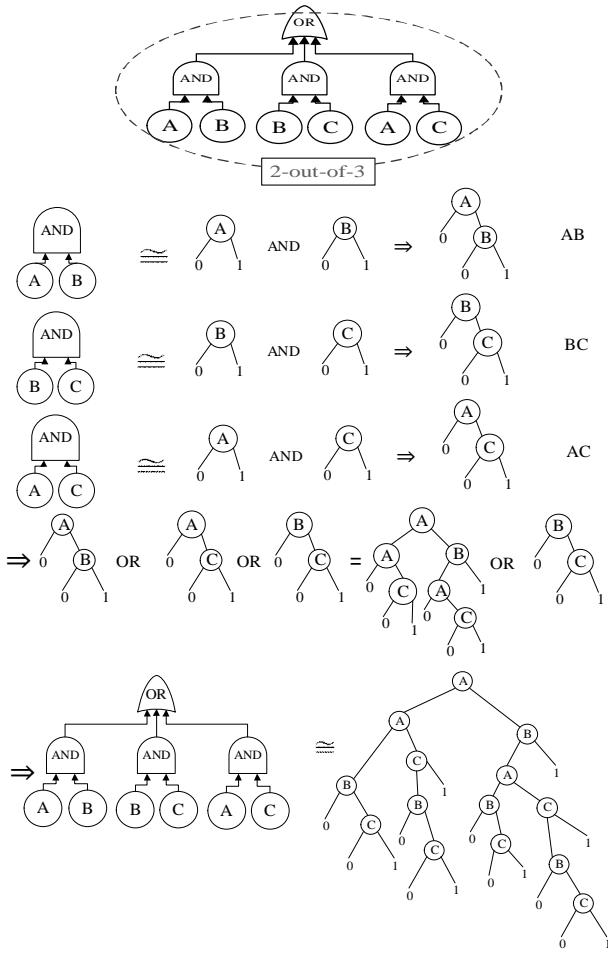
براساس قضیه مجموعه‌ها، داریم

$$N_{p(\tilde{\Omega}_f)} = 2^{N_{\tilde{\Omega}_f}} \quad (28)$$



شکل 7 درخت خطا سیستم چندحالته منسجم تشخیص شرایط اضطراری یک فضای پایه

شده و B به قسمت بازیری 1 المان A متصل می‌گردد) برای این المان‌ها وجود دارد. درنتیجه، برای درخت خطا بخش 2-out-of-3 (شکل 8) (داریم. به همین ترتیب و با استفاده از دیاگرام تصمیم بازیری برای هر یک از زیربخش‌های ورودی گیت AND برای رخداد رویداد اصلی، ساختار شکل 8 را می‌توان براساس OBDD بدست آورد.



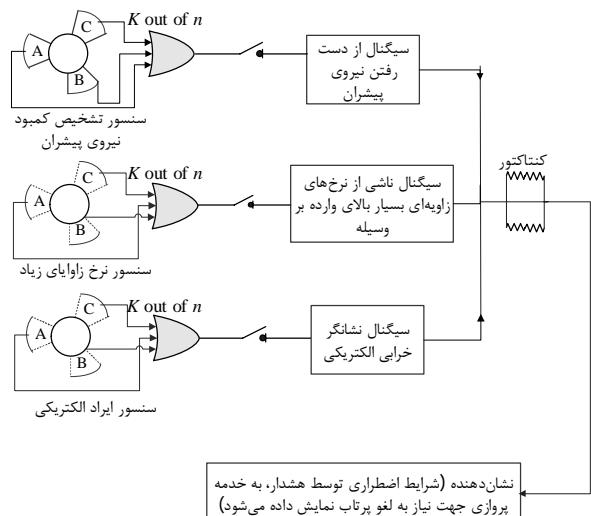
شکل 8 ساختار OBDD برای درخت خطا بخش 2-out-of-3

سیگنال را دریافت نکرده باشد و وجود دارد (2-out-of-3). برای تعیین احتمال رخداد رویداد اصلی، آنالیز کمی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. بطور گسترده، سه رویکرد کمی برای آنالیز درخت خطا سیستم‌های پیچیده وجود دارد: روش‌های مدولار [22,21] (ترکیبی از دو روش فوق) که بیشتر برای درخت خطاها دینامیکی کاربرد دارد [26,16]. برای آنالیز کمی سیستم فوق که یک درخت خطا استاتیکی است از روش حداقل مجموعه-برش یا دیاگرام تصمیم بازیری می‌توان استفاده کرد. درخت خطا منسجم مربوط به این سیستم چندحالته استاتیکی از یک روش ترکیبی به کمک روش مجموعه-برش و BDD استفاده خواهد شد.

رویدادهای x_1 , x_2 و x_3 سیستم‌های تشخیص سیگنال در هر یک از زیرسیستم‌ها بوده و از نوع k -out-of- n می‌باشند. این سه بخش یکسان بوده و برای تحلیل آنها روش BDD مورد استفاده قرار گرفته است. روش‌های بر مبنای BDD نیازمند حافظه و زمان محاسباتی کمتری می‌باشند و برای تحلیل درخت خطاها بزرگ راه حل کارآمدی را فراهم می‌آورند. برای انجام آنالیز کمی از درخت خطا استاتیکی فوق به کمک BDD، ابتدا درخت خطا را به BDD تبدیل کرده و سپس، BDD بدست آمده برای محاسبه عدمقابلیت اطمینان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

4-1 تبدیل درخت خطا به BDD

برای تبدیل درخت خطا از روش BDD مرتب شده (OBDD¹) با این قید که متغیرها براساس شاخص احتمال رخداد مرتب شده‌اند استفاده می‌شود. ابتدا باید ترتیب متغیرها/اجزاء انتخاب گردد. استراتژی ترتیب برای تولید OBDD بسیار مهم می‌باشد زیرا اندازه OBDD وابستگی بسیارشیدیدی به ترتیب متغیرها ورودی دارد. مرتب‌سازی ضعیف تأثیر قابل توجهی در اندازه OBDD داشته و زمان حل آنالیز قابلیت اطمینان را برای سیستم‌های بزرگ بیشتر می‌کند [16]. برای بخش 2-out-of-3، که دارای سه المان A, B, و C هم‌نوع می‌باشد فرض می‌شود که قید شاخص احتمال رخداد، $A < B < C$ (برای مثال، اگر A و B توسط یک گیت AND با هم ارتباط داشته باشند، المان A ریشه



شکل 6 دیاگرام ساده‌سازی شده منسجم برای سیستم چندحالته تشخیص شرایط اضطراری یک فضای پایه

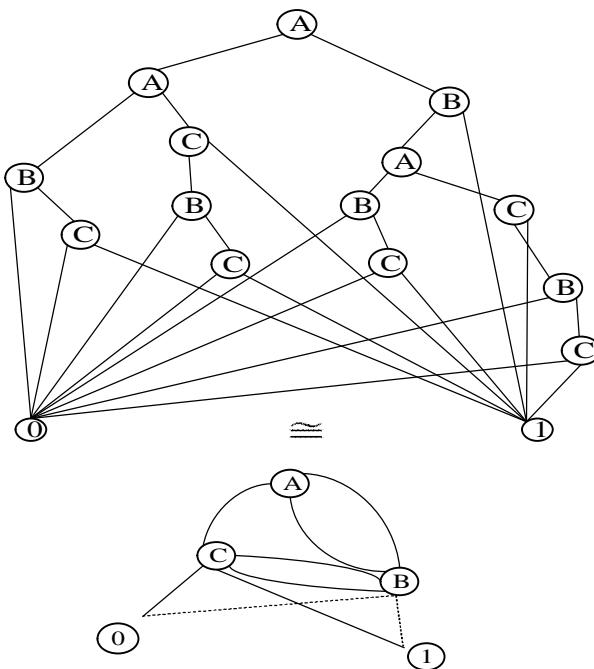
اگر ساختار BDD برای کل سیستم ترسیم گردد، در این صورت، سیستمی با پیچیدگی بالا و ترمهای اشتراکی بسیاری به وجود خواهد آمد که تحلیل چنین سیستمی چه به روش حداقل مجموعه-برش و چه با استفاده از روش BDD بسیار زمان بر و دارای تحلیل بسیار مشکلی به لحاظ ترمهای اشتراکی بوده و همچنین نتایج بدست آمده از دقت کمتری برخوردار خواهد بود. برای غلبه بر این مشکل، یک روش ترکیبی برای تحلیل درخت خطای استاتیکی فوق مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این روش، حداقل مجموعه-برش را با روش BDD ادغام شده و احتمال رخداد رویداد اصلی مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

2- تشکیل درخت خطای OBDD کاهش یافته

با ساخت OBDD برای سیستم مربوطه، قانون کاهش را به منظور حداقل ساختن برای ترتیب می‌توان بکار گرفت. بدلیل بیان جبر بولی، درخت‌های متضاد در شکل 8، باهم ادغام شده و زیر-OBDD ها و ترم‌های زائد حذف می‌شوند. در این صورت درخت خطای مرتب شده کاهش یافته (ROBDD⁽¹⁾) برای زیرسیستم بخش 2-out-of-3 همانند شکل 10 می‌باشد.

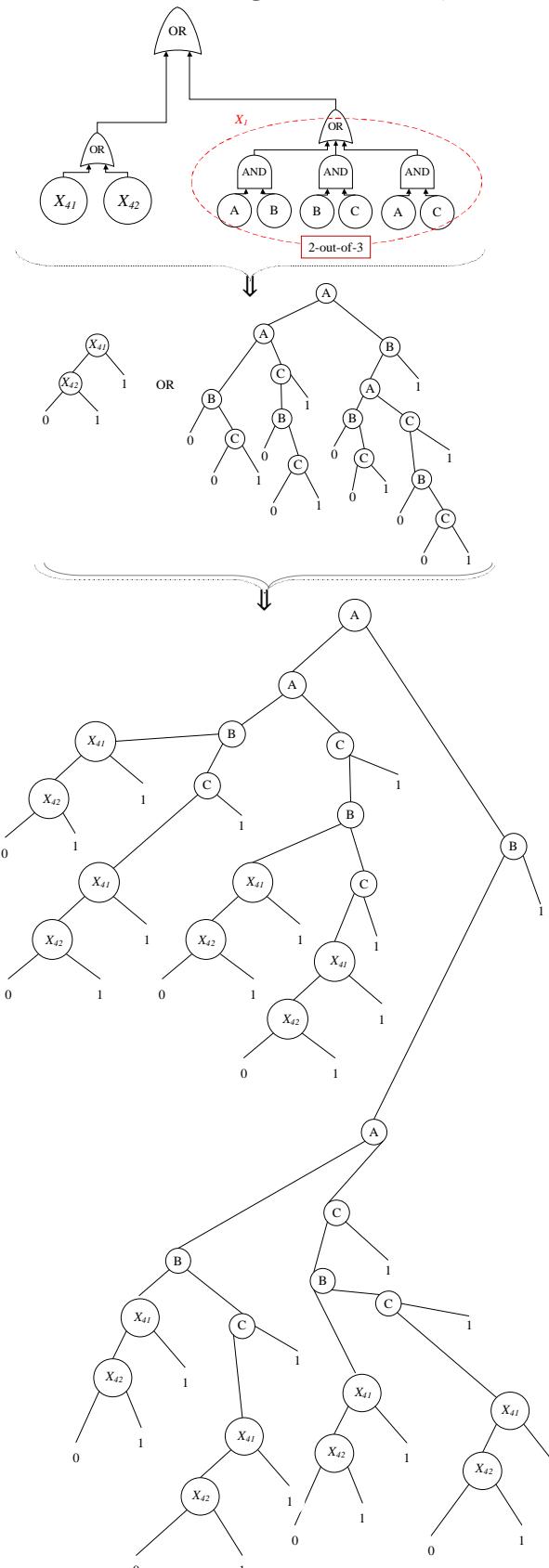
برای ساختار درخت خطای بخش 2-out-of-3 فوق و با فرض اینکه احتمال خرابی برای هر یک از اجزاء 8 برابر باشد، $P(A) = P(B) = P(C) = 0.02$ ، جدول 2 ترکیبی (جدول درستی) زیر را می‌توان براساس دیاگرام فوق تشکیل داد و حالت‌های شکست یا موفقیت را تعیین کرد. نکته اینکه 5 حالت موفقیت، و 3 حالت خرابی می‌باشند. براساس جدول 2، ترکیب‌های 4, 6, 7, و 8 منجر به رخداد رویداد خرابی از این بخش می‌شود (رویداد اصلی این بخش می‌باشد).

بنابراین، برای تحلیل درخت خطای کل سیستم، درخت خطای بخش 2-out-of-3 را با استفاده از روش تحلیل BDD انجام داده و حالت‌های خرابی این بخش که نشانگر رخداد رویداد اصلی مربوط به این بخش است، به عنوان یک ورودی به درخت خطای کل سیستم وارد می‌شود.



شکل 10 ساختار ROBDD برای درخت خطای بخش 2-out-of-3

شکل 9 نشانگر ساختار BDD فقط برای یکی از شاخه‌های درخت خطای مربوط به سیستم چند حالتی در شکل 7 می‌باشد.



شکل 9 ساختار OBDD برای یک از زیربخش‌ها

هر دو حالت یکسان و برابر $F(x_{41}) = F(x_{42}) = 0.01$ (همانند سیستم قبلی). با توجه به اینکه رویدادها دوبه‌دو مشترک می‌باشند، از رابطه مربوط به رویدادهای مشترک برای رخداد رویداد اصلی استفاده می‌شود، طبق رابطه ۴ مقدار زیر برای P_{TOP} بدست می‌آید.

$$P_{TOP} = \sum_{i=1}^k P(Y_i) - \underbrace{\sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} P(Y_i Y_j)}_{\text{ترمهای اشتراکی}} + \sum_{i=3}^k \sum_{j=2}^{i-1} \sum_{n=1}^{j-1} P(Y_i Y_j Y_n)$$

$$\Rightarrow P_{TOP} = [(0.02) - (0.006) + (0.0007)] \times 10^{-6} = 0.0147 \times 10^{-6}$$

اگر رویدادهای اصلی رویدادهای دوبه‌دو ناسازگار باشند، داریم:

$$F = \sum_{i=1}^k P(TOP_i) \quad (33)$$

: احتمال خرابی سیستم، k : تعداد کل حالت‌های خرابی سیستم.
و اگر رویدادهای اصلی مشترک باشند، در این صورت، از رابطه ۳۴ برای محاسبه احتمال خرابی سیستم استفاده می‌گردد.

$$F = \sum_{i=1}^k P(TOP_i) - \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} P(TOP_i TOP_j) + \dots + (-1)^{n-1} P(TOP_1 \dots TOP_k) \quad (34)$$

همان‌طور که مشخص است، ترم‌های آخر رابطه فوق، به استثنای ترم اول، سهم بسیار کمی در مقدار محاسبه فوق دارند. از این‌رو، ممکن است فقط ترم اول رابطه ۳۴ مورد استفاده قرار گیرد. یعنی، رابطه ۳۳ برای محاسبه مقدار تقریبی احتمال خرابی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد.
برای بیان کامل این روش، از مثال سیستم تشخیص شرایط اضطراری (EDS) یک فضای پیما استفاده می‌گردد. با این تفاوت که در اینجا، آنالیز سیستم از یک دیدگاه کلی‌تر صورت می‌گیرد، به این معنی که فرض می‌شود کل سیستم شامل دو زیرسیستم می‌باشد: زیرسیستم مربوط به فرستنده‌های سیگنال و زیرسیستم نشانده‌نده داخل کابین. بنابراین، دو حالت خرابی، حالت اول: خرابی سیستم به علت ایراد در فرستادن سیگنال توسط هر یک از زیرسیستم‌ها، و حالت دوم: خرابی سیستم به علت ایراد در نشانده‌نده را برای کل سیستم می‌توان تعریف کرد.

در این صورت، دو درخت خطای متفاوت برای هر یک از حالت‌ها باید ساخته شود. حالت اول مانند درخت خطای نشان داده شده در شکل ۲ می‌باشد. و همان‌طور که مشاهده شد، احتمال خرابی آن در بخش ۲-محاسبه گردید. درخت خطای مربوط به حالت دوم، باید براساس ساختار منطقی داخلی نشانده‌نده، که در بخش ۴-بطرور کامل نشان داده شده است، و همان‌طور که عدم اشتراک بخش فرستنده سیگنال و نشانده‌نده مشهود است، ساخته شود.

بنابراین، امکان دارد که پروسه‌های آنالیز جزئی حذف گردد و از نمادگذاری ساده X_5 برای نمایش رویداد اصلی دوم استفاده شود. حال فرض می‌شود که احتمال رخداد X_5 محاسبه گردیده و برابر 2.6×10^{-5} می‌باشد.

از آنجائی که دو حالت خرابی سیستم دوبه‌دو ناسازگار نمی‌باشند، بنابراین از رابطه ۳۳ برای محاسبه مقدار تقریبی احتمال خرابی کل سیستم

جدول ۲ ترکیب، حالات و احتمال رخداد برای درخت خطای بخش 2-out-of-3

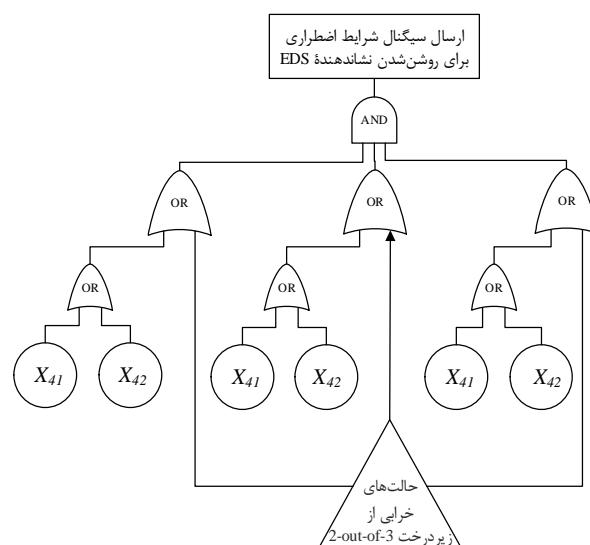
تعداد ترکیب	حالاتی سیستم	احتمال C_i	عملکرد سیستم
1		$A_S B_S C_S$	S
2		$A_S B_S C_F$	S
3		$A_S B_F C_S$	S
4		$A_S B_F C_F$	F
5		$A_F B_S C_S$	S
6		$A_F B_S C_F$	F
7		$A_F B_F C_S$	F
8		$A_F B_F C_F$	F

برای نمایش این تحلیل ترکیبی، روش حداقل مجموعه-برش بر مبنای دیاگرام تصمیم باینری (CSBDD¹) برای این سیستم پیچیده با ترم‌های اشتراکی زیاد، درخت خطای شکل ۷ را می‌توان همانند شکل ۱۱ ساده‌سازی کرد.

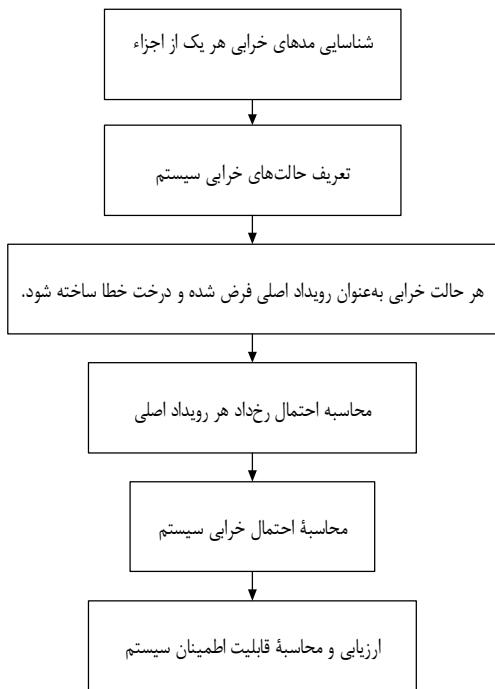
براساس شکل ۱۱ حداقل مجموعه‌های-برش (رابطه ۶) عبارتند از:

- $C(1): Y_1 = (F_1, F_2, F_3)$
- $C(2): Y_2 = (F_1, F_2, X_{41})$
- $C(3): Y_3 = (F_1, F_2, X_{42})$
- $C(4): Y_4 = (F_1, X_{41}, F_3)$
- $C(5): Y_5 = (F_1, X_{42}, F_3)$
- $C(6): Y_6 = (X_{41}, F_2, F_3)$
- $C(7): Y_7 = (F_2, F_3, X_{42})$
- $C(8): Y_8 = (X_{41}, X_{42})$

که در رابطه فوق، F_1, F_2, F_3 حالاتی خرابی برای هر کدام از بخش‌های 2-out-of-3 می‌باشند. بیشترین مقداری که برای حالت خرابی این زیرسیستم براساس جدول ۲ وجود دارد، مقدار ۰/۰۰۰۳۵۲ می‌باشد.
بنابراین، فرض می‌شود که احتمال خرابی هر یک از این بخش‌ها برابر ۰/۰۰۰۳۵۲ باشد. یعنی، $P(F_1) = P(F_2) = P(F_3) = 0.000352$ ، که بیانگر حد بالای خرابی برای این زیرسیستم‌ها است. و احتمال خرابی کنتاکتور در



شکل ۱۱ ساختار ترکیبی درخت خطای سیستم چندحالته غیرمنسجم تشخیص شرایط اضطراری یک فضای پیما



شکل 12 فلوچارت مربوط به آنالیز سیستم چند حالتی بر مبنای درخت خط

- حالات های خرابی مختلف سیستم معمولاً دارای رویدادهای دوبهدو مشترک می باشند.
- 3- هر حالت خرابی سیستم را به عنوان رویدادهای اصلی انتخاب کرده، درخت خطی مربوطه را ساخته و آنرا ساده کنید. زمانی که دلایل اصلی (یا حداقل مجموعه های برش، در صورت منسجم بودن سیستم) بدست آمدند، قضیه 2 باید برای چک صحت درخت های خطی رویدادهای دوبهدو ناسازگار مورد استفاده قرار گیرد.
 - 4- احتمال رخداد هر رویداد اصلی را با استفاده از روش ارائه شده در بخش 2- محاسبه کنید.

برای محاسبه احتمال خرابی سیستم، دو نوع متفاوت محاسبات براساس رویدادهای اصلی وجود دارد. محاسبات مربوط به رویدادهای دوبهدو ناسازگار و محاسبات مربوط به حالتی که رویدادها دارای ترم های مشترک باشند.

6- نتیجه گیری

در این مقاله، آنالیز قابلیت اطمینان و احتمال موفقیت سیستم چند حالتی تشخیص شرایط اضطراری (EDS) یک فضای پیما مورد بررسی قرار گرفت. این سیستم دارای پیچیدگی بالا و ترم های اشتراکی زیاد بود که تحلیل چنین سیستمی با استفاده از روش های حداقل مجموعه - برش و روش BDD بسیار زمان بر و تحلیل ترم های اشتراکی مشکل بوده و نتایج حاصله از دقت کمتری برخوردار خواهند بود. در این مقاله، الگوریتمی برای آنالیز سیستم چند حالتی بر مبنای درخت خط ارائه شد. درخت خطی مورد بررسی به صورت استاتیکی است که در تحقیقات آتی نویسندها، این درخت خط به صورت دینامیکی در نظر گرفته خواهد شد.

برای غلبه بر این مشکل، یک روش ترکیبی برای تحلیل درخت خطی استاتیکی توسعه داده شد. در این روش، مجموعه (سییر) حداقلی با روش BDD ادغام شده و احتمال رخدادن رویداد اصلی مورد محاسبه قرار می گیرد. در این تحقیق، آنالیز سیستم از یک دیدگاه کلی تر صورت گرفت، به این معنی که فرض شد کل سیستم شامل دو زیر سیستم؛ زیر سیستم مربوط به

استفاده شده و مقدار زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned}
 F &= \sum_{i=1}^k P(\text{TOP}_i) = \sum_{i=1}^2 P(\text{TOP}_i) = \\
 &(1.0673 \times 10^{-5}) + (2.6 \times 10^{-5}) = (3.6673 \times 10^{-5}) \\
 \text{با استفاده از رابطه 34 برای حالتی که خرابی های سیستم دوبهدو ناسازگار نمی باشند، مقدار دقیق احتمال خرابی کل سیستم را می توان بدست آورد. مقدار زیر برای احتمال خرابی کل سیستم قابل محاسبه است.} \\
 F &= \sum_{i=1}^k P(\text{TOP}_i) - \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} P(\text{TOP}_i \text{TOP}_j) \\
 &= P(\text{TOP}_1) + P(\text{TOP}_2) \\
 &- P(\text{TOP}_1 \times \text{TOP}_2) \\
 &= [(1.0673 + 2.6) - (1.0673 \times 2.6)] \\
 &\times 10^{-5} = 8.9232 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

در پایان، برای محاسبه مقدار قابلیت اطمینان سیستم یا احتمال موفقیت و کارکرد صحیح سیستم لغو پرتاب، می توان از رابطه 35 برای حالتی که رویدادها دوبهدو ناسازگار باشند استفاده کرد.

$$\begin{aligned}
 R + F &= 1 \Rightarrow R + \sum_{i=1}^k P(\text{TOP}_i) \\
 &= R + \sum_{i=1}^2 P(\text{TOP}_i) = 1 \Rightarrow \\
 &R + (1.0673 + 2.6) \times 10^{-5} = 1 \\
 &\Rightarrow R = 1 - (3.6673 \times 10^{-5}) = 0.999963 \quad (35)
 \end{aligned}$$

و به طریقی مشابه، مقدار قابلیت اطمینان یا احتمال موفقیت سیستم را برای حالتی که رویدادها دوبهدو مشترک می باشند، با استفاده از رابطه 36 قابل محاسبه می باشد.

$$\begin{aligned}
 R + F &= 1 \\
 \Rightarrow R + \sum_{i=1}^k P(\text{TOP}_i) - \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} P(\text{TOP}_i \text{TOP}_j) \\
 + \dots + (-1)^{n-1} P(\text{TOP}_1 \dots \text{TOP}_k) &= 1 \quad (36) \\
 \Rightarrow R + P(\text{TOP}_1) + P(\text{TOP}_2) - P(\text{TOP}_1 \times \text{TOP}_2) &= 1 \\
 \Rightarrow R = 1 - [(1.0673 + 2.6) - (1.0673 \times 2.6)] \\
 \times 10^{-5} &= 1 - 0.89232 \times 10^{-5} \\
 \Rightarrow R &= 0.9999910768
 \end{aligned}$$

R ، مقدار قابلیت اطمینان کل سیستم می باشد.

5- الگوریتم پیشنهادی

خلاصه ای از گام های آنالیز برای سیستم های چند حالتی متشكل از اجزاء چند حالتی که به کمک آنالیز درخت خط انجام می گیرد در فلوچارت شکل 12 آورده شده است. که عبارتند از:

مراحل ذکر شده در فلوچارت فوق، که در آنالیز سیستم موردنظر به کار گرفته شده اند عبارتند از:

1- مدهای خرابی هر یک از اجزاء را تعریف کرده، داده های خرابی اجزاء و مدهای خرابی را گردآوری کنید. به خاطر داشته باشید که مدهای خرابی یک جزء، دوبهدو ناسازگار می باشند.

2- حالت های خرابی سیستم را تعریف کنید. آنها ممکن است دارای رویدادهای دوبهدو مشترک یا رویدادهای دوبهدو ناسازگار باشند، اما اگر سعی برای آنالیز یک سیستم شامل اجزاء دو حالتی می باشد، و سعی برای ساده سازی کار با استفاده از درخت خطی منسجم باشد،

8- مراجع

- [1] B. Natvig, *Multistate systems reliability theory with applications.*, John Wiley & Sons, 2010.
- [2] L. Caldarola, *Fault tree analysis with multistate components*, in *Synthesis and analysis methods for safety and reliability studies.*, Springer, pp. 199-248, 1980.
- [3] Y.W. Liu and K.C. Kapur, *New Models and Measures for Reliability of Multi-state Systems*, in *Handbook of Performability Engineering*, Springer, pp. 431-445, 2008.
- [4] I. Gertsbakh and Y. Shpungin, *Multidimensional spectra of multistate systems with binary components*, in *Recent Advances in System Reliability*, Springer, pp. 49-61, 2012.
- [5] X. Huang, *The generic method of the multistate fault tree analysis*. *Microelectronics Reliability*, vol. 24, no. 4, pp. 617-622, 1984.
- [6] X. Janan, On multistate system analysis, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 34, no. 4, pp. 329-337, 1985.
- [7] R.E. Barlow and A.S. Wu, Coherent systems with multi-state components. *Mathematics of Operations Research*, vol. 3, no. 4, pp. 275-281, 1978.
- [8] L. Caldarola, Coherent systems with multistate components. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 58, no. 1, pp. 127-139, 1980.
- [9] A.T. Neil, *Apollo Experience Report-Launch Escape Propulsion Subsystem*, Manned Spacecraft Center Houston, Texas 77058, 1973.
- [10] S.I. Jimenez, B.C. Grover, *Apollo Spacecraft & Systems Familiarization*, NASA Space Division Downey, California, August 1967.
- [11] K.B. Misra, *Handbook of perfromability engineering*, Springer, 2008.
- [12] A. Lisnianski, and I. Frenkel, *Recent advances in system reliability*, Springer, 2012.
- [13] W.S. Lee, et al., *Fault Tree Analysis, Methods, and Applications □ A Review*, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 34, no. 3, pp. 194-203, 1985.
- [14] Y. Kai, Multistate fault-tree analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 28, no. 1, pp. 1-7, 1990.
- [15] G. Yingkui, and L. Jing, Multi-state system reliability: A new and systematic review. *Procedia Engineering*, vol. 29, pp. 531-536, 2012.
- [16] L. Xing, and S.V. Amari, *Fault tree analysis*, in *Handbook of perfromability engineering*, Springer, pp. 595-620, 2008.
- [17] Twigg DW, et al., Modeling mutually exclusive events in fault trees. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*: pp. 8-13, Los Angles, CA, 2000.
- [18] DW Twigg, AV Ramesh, and S. TC., Modeling event dependencies using disjoint sets in fault trees. *Proceedings of the 18th International System Safety Conference 2000*: pp. 275-279, 2000.
- [19] JD Andrews and D.SJ., Event-tree analysis using binary decision diagrams. *IEEE Transactions on Reliability*; vol. 49, no. 2, pp. 230-238, 2000.
- [20] M. Modarres, M. Kaminskiz, and V. Krivstov, *Realiability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide*. Vol. 55: CRC press, 1999.
- [21] J.B. Dugan, S.J. Bavuso, and B. MA, Fault trees and Markov models for reliability analysis of fault tolerant systems. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 39, pp. 291-307, 1993.
- [22] Sugier, J. Reliability analysis based on Markov models adjusted to various maintenance policies. in *Proceedings of the 11th International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat'11)*, 2011.
- [23] Xu, H. and J.B. Dugan. Combining dynamic fault trees and event trees for probabilistic risk assessment. in *Reliability and Maintainability, 2004 Annual Symposium-RAMS*, IEEE, 2004.
- [24] Dugan, J.B., and S. A. Doyle, *New results in fault-tree analysis, Tutorial notes of the Annual Reliability & Maintainability Symposium*, Jan. 1997.
- [25] M. Stamatelatos, and J. Caraballo, *Fault tree handbook with aerospace applications.*, Office of safety and mission assurance NASA headquarters, 2002.
- [26] R. Gulati, and J.B. Dugan. A modular approach for analyzing static and dynamic fault trees. in *Reliability and Maintainability Symposium, Proceedings, Annual*, IEEE, 1997.

فرستنده‌های سیگنال و زیرسیستم نشانده‌های داخل کابین می‌باشد. درخت خطای متفاوت برای هر یک از حالت‌ها ساخته شده و در پایان، نتایج مربوط به احتمال خرابی برای سیستم چند حالتی مشکل از اجزاء چند حالتی به کمک آنالیز درخت خطای ارائه شده و مقدار قابلیت اطمینان سیستم محاسبه می‌شود.

7- فهرست عالم

F احتمال شکست (خرابی)

M مدهای خرابی

N مجموع تعداد رویدادهای اصلی

P احتمال رخداد

R قابلیت اطمینان

x_{li} حالت خرابی

Y حداقل مجموعه-برش

علامیونانی

α_{li} ضریب حالت برای آمنی حالت خرابی جزء ام

φ(x)تابع ساختار

Ω فضای حالت سیستم

بالنویس‌ها

BDD دیاگرام تصمیم باینری

CFT درخت خطای منسجم

CSBDD مجموعه-برش بر مبنای دیاگرام تصمیم باینری

EDS سیستم تشخیص شرایط اضطراری

EDSI نشان‌دهنده سیستم تشخیص شرایط اضطراری

FTA آنالیز درخت خطا

OBDD دیاگرام تصمیم باینری مرتب شده

ROBDD دیاگرام تصمیم باینری مرتب شده کاهش یافته

TOP رویداد اصلی

زیرنویس‌ها

f حالت شکست

j.i اندیس‌های شمارشی

k تعداد کل حالت‌های خرابی

l المان پایه‌ای

n بردار n-بعدی

s حالت موفقیت