

## ارزیابی قابلیت دسترسی و قابلیت اطمینان سیستم کنترل پرواز یک نوع هواپیما و بررسی نقش شرایط محیطی در تعیین آنها

**فریده ذهبی**  
کارشناس ریاضی و آمار  
سازمان آموزش و پرورش خراسان  
faridehzahabi@yahoo.com

**علی پیروی**  
عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد  
دانشکده مهندسی  
ali\_peiravi@yahoo.com

**صادق فاضل**  
کارشناس ارشد مهندسی برق  
سازمان صنایع هوافضا  
Sadegh\_fazel @ noavar.com

### واژه های کلیدی: قابلیت اطمینان، MTTF، شرایط محیطی، نرخ خرابی، افزونگی

**چکیده:** شرایط محیطی کار سیستم ها نقش مهمی در تعیین قابلیت دسترسی، قابلیت اطمینان، نرخ خرابی و میانگین عمر مفید<sup>1</sup> آنها دارد. قابلیت دسترسی و قابلیت اطمینان یک سیستم بسته به شرایط محیطی متفاوت مانند زمین، دریا، هوا و فضا، کاملاً متفاوت خواهند بود. اما بررسی این مسئله به صورت کمی، برای انتخاب تجهیزاتی که بتوانند در شرایط محیطی مورد نظر به راحتی قابل دسترس بوده و با قابلیت اطمینان بالایی کار کنند، از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

در این مقاله ابتدا یک روش عملی جهت بررسی کمی تغییرات قابلیت دسترسی، قابلیت اطمینان و MTTF سیستم ها، بر حسب شرایط محیطی کار آنها معرفی می شود. مجموعه مورد مطالعه در این تحقیق، سیستم کنترل پرواز نوعی هواپیما می باشد که رفتار آن از دیدگاه قابلیت اطمینان به کمک دو راهکار تحلیلی R.B.D.<sup>2</sup> و فضای حالت مدل سازی می شود. سپس نتایج ارزیابی قابلیت دسترسی، قابلیت اطمینان و MTTF این سیستم، با این فرض که در شرایط محیطی متفاوتی به کار گرفته شود، ارائه و با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

هر چند مثال عملی ارائه شده در این مقاله نوعی سیستم کامپیوتری کنترل پرواز می باشد، اما نتایج حاصله در مورد سیستم های دیگر (الکترونیکی، هیدرولیکی، مکانیکی و...) که در سایر صنایع مانند برق، نفت و پتروشیمی مورد استفاده قرار می گیرند، نیز صحیح بوده و تنها راهکارها و روابط موجود، در مورد آنها قدری متفاوت است.

<sup>1</sup> Mean Time To Failure (MTTF)

<sup>2</sup> Reliability Block Diagram (R.B.D.)

## ۱- مقدمه

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های الکترونیکی از اوایل دهه ۱۹۴۰ میلادی به طور همزمان توسط گروهی از محققین هوافضای آلمان به سرپرستی دکتر ورنهر فن براون و گروهی دیگر از محققین هوا فضای آمریکا آغاز گردیده و در سال ۱۹۵۰ مدون گردید. اهمیت توجه به قابلیت اطمینان تجهیزات صنعتی از آنجا آشکار می‌شود که عدم توجه به آن در بسیاری از صنایع می‌تواند عواقب بسیار خطرناکی از نظر جانی و عواقب پرهزینه‌ای از نظر اقتصادی، سیاسی، امنیتی و حیثیتی در برداشته باشد. به عنوان مثال می‌توان از حوادث چرنوبیل و انفجار سفینه فضایی چلنجر در سال ۱۹۸۶ و انفجار سفینه فضایی کلمبیا در سال ۲۰۰۳ نام برد. در اثر این حوادث علاوه بر تلفات جانی **میلیاردها دلار** خسارات اقتصادی به بار آمد [۱].

در مورد سفینه فضایی شاتل، با وجود اینکه برای تضمین قابلیت اطمینان بالا در بخش کامپیوتر پرواز آن از چهار کامپیوتر کاملاً مشابه که هر یک دارای حسگرهای مجزا بودند استفاده شده بود، اما این سفینه نیز دچار مشکل شد [۲]. بر اساس گزارش Feynman یکی از دلایل اصلی انفجار سفینه فضایی شاتل نقص در طراحی مفصل بوستر موتور راکت آن بوده است. به طوری که از هر ۲۹۰۰ پرواز ۱۲۱ مورد، موتور راکت‌های جامد منجر به خرابی شدند. این به معنای وجود عدم قابلیت اطمینان به میزان چهار درصد می‌باشد، که بسیار بالا است. موتور اصلی شاتل نیز دارای ضعف‌هایی بوده و در تست عملکردی به مدت ۲۵۰/۰۰۰ ثانیه ۱۶ مرتبه خطای عمده را تجربه کرده است [۳]. از دلایل مهم دیگر انفجار این سفینه قدیمی بودن تکنولوژی ساخت کامپیوترها و وجود اشکال در حسگرهای به کار رفته در آن می‌باشد [۳].

در ایران هر چند در سال‌های اخیر در دانشگاه‌ها و بعضی از مراکز تحقیقاتی وابسته به صنایع هوافضا و هواپیماسازی [۴-۷]، صنایع برق کشور [۸]، و سایر سازمان‌ها، توجه به کاربرد علم قابلیت اطمینان روزافزون شده است، اما با توجه به اینکه عامل اصلی بسیاری از حوادث ناگوار در کشور ما قابلیت اطمینان پایین و فرسوده بودن بسیاری از سیستم‌ها می‌باشد، برای رسیدن به سطح مطلوب، نیاز به توجه و انجام تحقیقات بسیار وسیع‌تر و گسترده‌تری در این زمینه می‌باشد.

در مقایسه با سایر مقالات ارائه شده در زمینه تخمین قابلیت اطمینان سیستم‌ها، ویژگی این مقاله در این است که در این تحقیق اولاً یک راهکار عملی برای **بررسی کمی** تغییرات قابلیت اطمینان، قابلیت اطمینان و MTTF سیستم‌ها برحسب شرایط محیطی کار آنها، ارائه گردیده است. ثانیاً قابلیت اطمینان و میانگین عمر مفید سیستم مورد مطالعه در چندین حالت مختلف (با تغییر شرایط محیطی) به دست آمده و با مقایسه آنها با یکدیگر، اهمیت شرایط محیطی در تعیین قابلیت اطمینان سیستم‌ها نشان داده شده است. علاوه بر این در سایر مقالات تمرکز بر ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها بوده است، در حالی که در این مقاله قابلیت دسترسی سیستم نیز تخمین زده شده است.

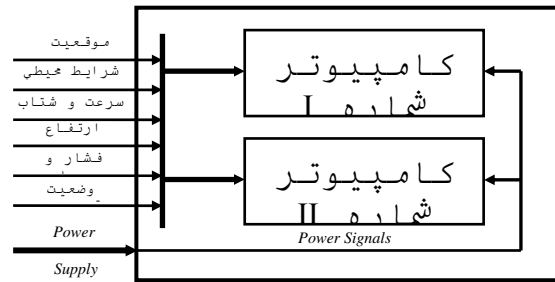
## ۲- شناسایی سیستم

سیستم کنترل پرواز، وظیفه ناوبری، هدایت و کنترل نوعی هواپیما را به عهده دارد. همچنین این سیستم با دریافت و ارسال سیگنال‌هایی، وضعیت سایر تجهیزات را مشخص کرده و در صورت بروز عیب، رخداد آن را از طریق مانیتور و پنل موجود در مجموعه به خلبان اطلاع می‌دهد [۱۲].

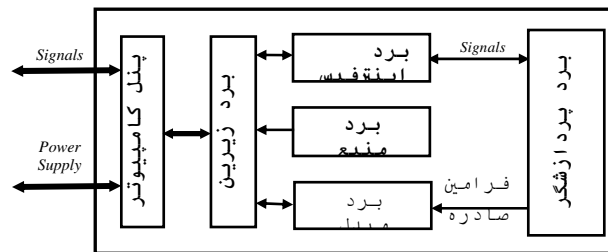
با توجه به اهمیت وظایفی که این سیستم به عهده دارد، مطابق شکل (۱) از دو کامپیوتر صنعتی مشابه تشکیل شده که کامپیوتر کنترل پرواز نامیده می‌شوند. نوع افزونگی به کار رفته در این سیستم، افزونگی فعال<sup>۱</sup> است. به طوری که اگر یکی از دو کامپیوتر خراب شود، دیگری جایگزین آن شده و وظایف آن را انجام می‌دهد.

<sup>۱</sup> Active Redundancy

شکل (۲) ارتباط بین زیرسیستم های کامپیوتر کنترل پرواز را نشان می دهد. وظایف اجزای تشکیل دهنده این نوع کامپیوتر صنعتی به شرح زیر می باشند:



شکل (۱): سیستم کنترل پرواز



شکل (۲): ارتباط بین زیرسیستم ها در کامپیوتر کنترل پرواز

- ۱- **برد پردازشگر:** انجام پردازش دیجیتال.
- ۲- **برد اینترفیس:** برقراری ارتباط با کامپیوتر دیگر، مانیتور و چاپگر مجموعه.
- ۳- **برد مبدل:** دریافت و تبدیل سیگنال های آنالوگ به دیجیتال و بالعکس.
- ۴- **منبع تغذیه:** تولید سطوح مختلف ولتاژ DC مورد نیاز.
- ۵- **برد زیرین:** ایجاد ارتباط بین بردها و پنل کامپیوتر صنعتی به کمک یک نوع باس استاندارد.
- ۶- **پنل:** ایجاد ارتباط کامپیوتر صنعتی با خارج آن.

در زمینه ارتباطات بین قطعات، زیرسیستم ها و کامپیوترهای مجموعه کنترل پرواز تعداد زیادی نقشه وجود دارد که امکان ارائه آنها در این مقاله وجود ندارد [۱۴]. همچنین در بخش (۲) از مرجع [۶]، توضیحات کامل تری درباره وظایف و اجزای تشکیل دهنده کامپیوترهای کنترل پرواز این سیستم و اجزای تشکیل دهنده آن ارائه شده است.

### ۳- معرفی کمیت های مورد استفاده جهت ارزیابی قابلیت دسترسی، قابلیت اطمینان و MTTF

مهمترین کمیت توصیف کننده رفتار قطعات یا سیستم ها از دیدگاه قابلیت اطمینان عمر قطعه ( $T_U$ ) و مهمترین کمیت توصیف کننده رفتار قطعات یا سیستم ها از دیدگاه قابلیت تعمیر زمان تا تعمیر ( $T_R$ ) می باشند. این کمیت ها متغیر تصادفی بوده و به ترتیب دارای توابع توزیع احتمال  $f_{T_U}(t)$  و  $f_{T_R}(t)$  می باشند. در این مقاله تابع توزیع در نظر گرفته شده برای این متغیرها، تابع توزیع نمایی می باشد. مهمترین مشخصه این نوع تابع توزیع این است که در آن نرخ خرابی و نرخ تعمیر قطعات و واحدها ثابت می باشند. سایر توابع توصیف کننده رفتار قابلیت اطمینان سیستم ها و مقادیر تابع توزیع نمایی متناظر با آنها عبارتند از [۹-۱۱]:

- میانگین زمان تا خرابی (MTTF)<sup>۱</sup> و میانگین زمان تا تعمیر (MTTR)<sup>۲</sup>: MTTF میانگین عمر مفید و MTTR میانگین زمان تا تعمیر قطعه یا واحد مورد نظر می باشد.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f_{T_U}(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (۱)$$

$$MTTR = \int_0^{\infty} t f_{T_R}(t) dt = \frac{1}{\mu} \quad (۲)$$

- میانگین زمان بین خرابی ها (MTBF)<sup>۳</sup>: میانگین زمان تجدید دوره های کارکرد و تعمیرات قطعه یا واحد مورد نظر می باشد.

$$MTBF = E[T_U + T_R] = MTTF + MTTR \quad (۳)$$

- نرخ خرابی و نرخ تعمیر: برای زمان کوچک  $\Delta t$ ،  $\lambda(t) \cdot \Delta t$  احتمال آن را مشخص می کند که قطعه یا سیستمی که تا زمان  $t$  سالم کار کرده است، در زمان  $(t + \Delta t)$  خراب شود. همچنین برای زمان کوچک  $\Delta t$ ،  $\mu(t) \cdot \Delta t$  احتمال آن را مشخص می کند که قطعه یا سیستمی که تا زمان  $t$  تحت تعمیر قرار داشته است، در زمان  $(t + \Delta t)$  خراب شود.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[\text{System Down in } (t, t + \Delta t) | \text{System Up at } t] = \lambda = \frac{1}{MTTF} = \text{نرخ خرابی} \quad (۴)$$

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[\text{System Up } (t, t + \Delta t) | \text{System Down at } t] = \mu = \frac{1}{MTTR} = \text{نرخ تعمیر} \quad (۵)$$

- تابع قابلیت اطمینان<sup>۴</sup>: احتمال اینکه قطعه یا سیستم مورد نظر وظیفه خود را در بازه زمانی  $(0, t]$  با موفقیت انجام دهد.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t} \quad (۶)$$

$$Q(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (۷)$$

- تابع قابلیت دسترسی<sup>۵</sup>: احتمال آن را مشخص می کند که قطعه یا واحد مورد نظر وظیفه خود را در لحظه  $t$  با موفقیت انجام دهد. مقدار این کمیت در حالت دائمی با رابطه (۸) تعیین می شود.

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{MTTF}{MTBF} \quad (۸)$$

$$\bar{A} = 1 - A = \frac{MTTR}{MTBF}$$

#### ۴- ضریب شرایط محیطی و رابطه آن با توابع نرخ خرابی و قابلیت اطمینان

نرخ خرابی قطعات الکترونیکی تابع عوامل زیادی بوده و با رابطه (۵) مشخص می شود [۹-۱۱].

<sup>۱</sup> Mean Time To Failure (MTTF)

<sup>۲</sup> Mean Time To Repair (MTTR)

<sup>۳</sup> Mean Time Between Failure (MTBF)

<sup>۴</sup> Reliability Function

<sup>۵</sup> Availability Function

$$\lambda = \pi_E * f(\pi_T, \pi_Q, \pi_S, \dots) \quad (9)$$

در رابطه فوق  $\pi_E$  ضریب شرایط محیطی نامیده شده و  $f$  تابعی از ضریب کیفیت ( $\pi_Q$ ) و ضریب شرایط دمایی ( $\pi_T$ ) و ضریب استرس الکتریکی ( $\pi_S$ ) و سایر عوامل دیگر می باشد. بنابراین نرخ خرابی قطعات با ضریب شرایط محیطی آنها نسبت مستقیم دارد. ارتباط تابع قابلیت اطمینان با ضریب شرایط محیطی نیز از طریق روابط (۶) و (۹) برقرار می شود.

**جدول (۱):** نام تعدادی از سازمان ها و مراکز صاحب سبک در زمینه تخمین نرخ خرابی قطعات الکترونیکی و نام اسناد ارائه شده توسط آنها

ردیف	نام سازمان	نام سند
۱	Department of Defense of USA	MIL-HDBK-217F
۲	Bell Laboratory	RPP
۳	Reliability Analysis Center (U.S.A.)	EPRD
۴	British telecommunication System	HRD4
۵	French National Center for telecommunication Studies	CNET
۶	Chinese Standard	299B

**جدول (۲):** شرایط محیطی مختلف کار تجهیزات الکترونیکی

ردیف	علامت	نوع شرایط محیطی	توضیحات
۱	$G_B$	Ground, Benign	زمینی، کنترل شده
۲	$G_F$	Ground, Fixed	زمینی، ثابت
۳	$G_M$	Ground, Mobile	زمینی، متحرک
۴	$N_S$	Naval, Sheltered	دریایی، سرپوشیده
۵	$N_U$	Naval, UnSheltered	دریایی، روباز
۶	$A_{IC}$	Airborne, Inhabited, Cargo	هوایی، با سرنشین، بار
۷	$A_{IF}$	Airborne, Inhabited, Fighter	هوایی، با سرنشین، جنگنده
۸	$A_{UC}$	Airborne, UnInhabited, Cargo	هوایی، بدون سرنشین، بار
۹	$A_{UF}$	Airborne, UnInhabited, Fighter	هوایی، بدون سرنشین، جنگنده
۱۰	$A_{RW}$	Airborne, Rotary, Winged	هوایی، بالگرد
۱۱	$S_F$	Space, Flight	فضا، در حال پرواز
۱۲	$M_F$	Missile, Flight	موشکی، در حال پرواز
۱۳	$M_L$	Missile, Launch	موشکی، پرتاب
۱۴	$C_L$	Cannon, Launch	پرتابه ها، در حال پرتاب

**۵- شرایط محیطی کار سیستم ها و روش تعیین ضریب شرایط محیطی ( $\pi_E$ )**

شرایط محیطی تجهیزات الکترونیکی کاملاً متنوع بوده و شامل انواع شرایط کاری زمینی، دریایی و هوایی می شود. اگر چه قابلیت اطمینان سیستم ها دارای قوانین ثابت و تغییرناپذیری می باشد، اما در عمل شرکت های مختلف اقدام به تخمین نرخ خرابی قطعات الکترونیکی و ارائه اسناد متفاوتی در این زمینه نموده اند [۱۱-۱۳]. جدول (۱) نام تعدادی از سازمان ها و مراکز صاحب سبک در این زمینه و نام اسناد ارائه شده توسط آنها را نشان می دهد.

در میان این اسناد، سند MIL-HDBK-217F منتشر شده توسط وزارت دفاع آمریکا به دلیل کامل بودن و آسان بودن بهره برداری از آن، عمده ترین مرجع تخمین قابلیت اطمینان تجهیزات الکترونیکی به شمار می رود [۱۲]. در این سند مدل های نرخ خرابی برای نود قطعه مهم الکترونیکی (از آی سی ها تا قطعات غیرفعال مانند خازن ها و مقاومت ها) که در سیستم های مدرن استفاده می شوند، آمده است. صنایع تابعه وزارت دفاع آمریکا و بسیاری از کشورهای دیگر از این سند جهت تعیین ضریب شرایط محیطی استفاده می کنند. ما نیز جهت انجام تحقیقات خود از این سند استفاده کرده ایم. در این سند مطابق با جدول (۲)، شرایط محیطی کار سیستم ها به چهارده نوع تقسیم بندی شده اند. در جدول (۳) ضریب شرایط محیطی بعضی از قطعات الکترونیکی مطابق این سند ارائه شده است.

جدول (۳): ضریب شرایط محیطی قطعات مختلف الکترونیکی

No.	Part Type	Environment														
		G <sub>B</sub>	G <sub>F</sub>	G <sub>M</sub>	N <sub>S</sub>	N <sub>U</sub>	A <sub>IC</sub>	A <sub>IF</sub>	A <sub>UC</sub>	A <sub>UF</sub>	A <sub>RW</sub>	S <sub>F</sub>	M <sub>F</sub>	M <sub>L</sub>	C <sub>L</sub>	
1	Microcircuits	0.5	2.0	4.0	4.0	6.0	4.0	5.0	5.0	8.0	8.0	0.5	5	12	220	
2	Semiconductor	Low Frequency	1	6	9	9	19	13	29	20	43	24	0.5	14	32	320
		High Frequency	1	2	5	4	11	4	5	7	12	16	0.5	9	24	250
		Optoelectronics	1	2	8	5	12	4	6	6	8	17	0.5	9	24	450
3	Resistors	1	4.0	16	12	42	18	23	31	43	63	0.5	37	87	1728	
4	Capacitors	1	10	20	7	15	12	15	25	30	40	0.5	20	50	570	
5	Inductive Devices	1	6	12	5	16	6	8	7	9	24	0.5	13	34	610	
6	Synchros and Resolvers	1	2	12	7	18	4	6	16	25	26	0.5	14	36	680	
7	Relays	Mechanical	1	2	15	8	27	7	9	11	12	46	0.5	25	66	N/A
		Time Delay	1	3	12	6	17	12	19	21	32	23	0.4	12	33	590
8	Switches	1	3	18	8	29	10	18	13	22	46	0.5	25	67	1200	
9	Circuit Breakers	1	2	15	8	27	7	9	11	12	46	0.5	25	66	N/A	
10	Connectors	General	1	1	8	5	13	3	5	8	12	19	0.5	10	27	490
		Sockets	1	3	14	6	18	8	12	11	13	25	0.5	14	36	650
11	Interconnection assemblies (PTH)	1	2	7	5	13	5	8	16	28	19	0.5	10	27	500	
12	Connection	1	2	7	4	11	4	6	6	8	16	0.5	9	24	420	
13	Meters , Panel	1	4	25	12	35	28	42	58	73	60	1.1	60	N/A	N/A	
14	Quartz Crystals	1	3	10	6	16	12	17	22	28	23	0.5	13	32	500	
15	Lamps	1	2	3	3	4	4	4	5	6	5	0.7	4	6	27	
16	Electronic Filters	1	2	6	4	9	7	9	11	13	11	0.8	7	15	120	
17	Fuses	1	2	8	5	11	9	12	15	18	16	0.9	10	21	230	

## ۶- مدل سازی

جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم ها می توان از دو روش **تحلیلی** و **شبیه سازی کامپیوتری** استفاده کرد. در روش های تحلیلی عمر قطعه، یا سیستم مورد نظر توسط توابع ریاضی تحلیلی توصیف شده و سایر توابع قابلیت اطمینان با روابط موجود به دست می آیند. در مرجع [۶] الگوریتم شبیه سازی و تخمین قابلیت اطمینان و در مرجع [۴] الگوریتم شبیه سازی و تخمین MTTR سیستم ها به روش مونت کارلو ارائه شده است.

برای انجام مطالعات حاضر، سیستم مورد مطالعه از سه دیدگاه مختلف و با سه روش متفاوت به شرح زیر مدل سازی شده است:

۱- **قابلیت اطمینان:** ترکیبی از روش های تحلیلی R.B.D.<sup>۱</sup> و فضای حالت

۲- **قابلیت تعمیر:** به روش شبیه سازی مونت کارلو

۳- **قابلیت دسترسی:** با استفاده از روش فضای حالت

## ۶-۱- الگوریتم تخمین قابلیت اطمینان سیستم های سری موازی به روش R.B.D.:

<sup>1</sup> Reliability Block Diagram (R.B.D.)

۱- تابع نرخ خرابی ( $\lambda_i$ ) و قابلیت اطمینان ( $R_i(t)$ ) تمام قطعات سیستم مورد نظر را با استفاده از استانداردهای موجود در این زمینه [۱۱-۱۳] و رابطه (۶) تخمین بزنید.

۲- مدل قابلیت اطمینان سیستم مورد نظر را به روش R.B.D. استخراج کنید [۱۱-۱۳].

۳- در مدل قابلیت اطمینان به جای همه قطعاتی که با یکدیگر سری می باشند، یک المان جایگزین کنید. نرخ خرابی المان جایگزین به جای چند المان سری برابر مجموع نرخ خرابی آنها و قابلیت اطمینان آن برابر حاصلضرب قابلیت اطمینان آنها می باشد (روابط (۱۰) و (۱۱)).

$$\lambda_{Si}(t) = \sum_{i=1}^{n_s} \lambda_i(t) \quad (10)$$

$$R_{Si}(t) = \prod_{i=1}^{n_p} R_i(t) \quad (11)$$

همچنین به جای همه قطعاتی که با یکدیگر موازی می باشند، یک المان جایگزین کنید. قابلیت اطمینان این المان از رابطه (۱۲) به دست می آید.

$$R_{Pi}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n_p} (1 - R_i(t)) \quad (12)$$

مرحله سوم را آن قدر ادامه دهید تا مدل قابلیت اطمینان سیستم تبدیل به یک المان شود. نرخ خرابی و قابلیت اطمینان این المان معادل نرخ خرابی و قابلیت اطمینان سیستم مورد نظر است.

## ۲-۶ مدل قابلیت اطمینان سیستم کنترل پرواز

در این مقاله جهت تخمین قابلیت اطمینان کامپیوترهای کنترل پرواز از روش تحلیلی R.B.D. و جهت تخمین قابلیت دسترسی و قابلیت اطمینان کل سیستم کنترل پرواز از روش فضای حالت<sup>۱</sup> استفاده کرده ایم.

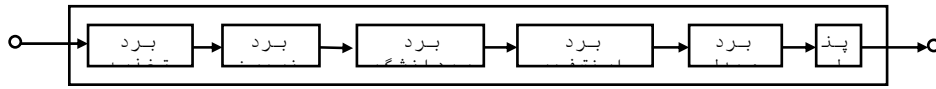
از دیدگاه قابلیت اطمینان هرگاه در ساختار یک سیستم از هیچ نوع افزونگی استفاده نشده و خرابی هر یک از واحدهای تشکیل دهنده آن منجر به خرابی سیستم شود، مدل قابلیت اطمینان آن سیستم سری است. و چنانچه در یک سیستم جهت انجام ماموریتی خاص بیش از یک واحد وجود داشته باشد به طوری که سالم بودن تنها یکی از آنها برای انجام آن ماموریت کافی باشد، مدل قابلیت اطمینان آن موازی است [۹-۱۱].

با مطالعه اسناد و کاتالوگ های موجود در زمینه شناسایی کامپیوترهای کنترل پرواز، مشخص گردید که خرابی هر یک از قطعات و زیرسیستم های آنها، باعث می شود که آنها نتواند وظیفه خود را انجام دهند [۱۴]. بنابراین مدل قابلیت کامپیوترهای کنترل پرواز سری و مطابق شکل (۳) است. اما با توجه به اینکه ماموریت سیستم کنترل پرواز با سالم بودن تنها یکی از دو کامپیوتر کنترل پرواز به انجام می رسد [۱۴]، و از طرف دیگر کامپیوترهای کنترل پرواز سیستم های تعمیر پذیری می باشند، بنابراین برای مدل سازی قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی آنها مطابق شکل (۴) از مدل فضای حالت استفاده گردید.

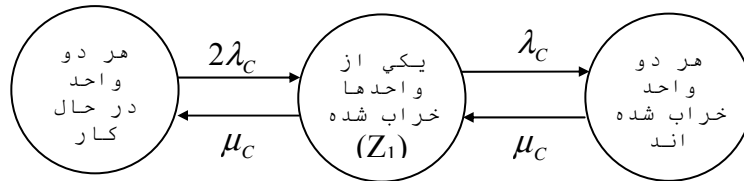
در شکل (۴) مدل فضای حالت سیستم دارای افزونگی یک از دو، در سه حالت مختلف رسم شده است. در این شکل ها فضای حالت سیستم از سه حالت  $\{0,1,2\}$  تشکیل شده و شماره حالت برابر تعداد واحدهایی است که در آن حالت کار می کنند. همچنین  $\lambda_C$  و  $\mu_C$  به ترتیب نرخ خرابی و نرخ تعمیر کامپیوترهای کنترل پرواز می باشند.

<sup>1</sup> State Space Method

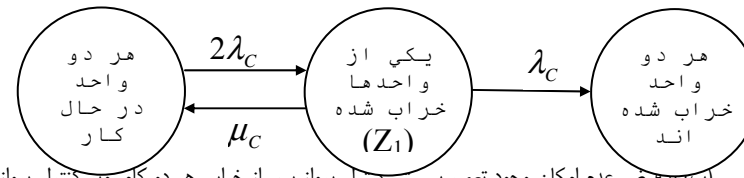
در شکل (۴-الف) مدل فضای حالت سیستم با فرض امکان وجود تعمیر سیستم کنترل پرواز پس از خرابی هر دو کامپیوتر کنترل پرواز ارائه شده است. از این مدل جهت تخمین قابلیت دسترسی سیستم کنترل پرواز استفاده می‌شود. در شکل (۴-ب) مدل فضای حالت با فرض عدم امکان وجود تعمیر سیستم کنترل پرواز پس از خرابی هر دو کامپیوتر کنترل پرواز رسم شده است. از این مدل جهت تخمین MTTF و قابلیت اطمینان سیستم کنترل پرواز استفاده می‌شود.



شکل (۳): مدل قابلیت اطمینان کامپیوتر شماره I و II



(الف) با فرض امکان وجود تعمیر سیستم کنترل پرواز پس از خرابی هر دو کامپیوتر کنترل پرواز



(ب) با فرض عدم امکان وجود تعمیر سیستم کنترل پرواز پس از خرابی هر دو کامپیوتر کنترل پرواز

شکل (۴): نمودار فضای حالت سیستم کنترل پرواز دارای افزونگی یک از دو متشکل از دو کامپیوتر کنترل پرواز مشابه

در مرجع [۱] روش‌های تخمین قابلیت اطمینان، MTTF و قابلیت دسترسی سیستم کنترل پرواز هواپیما، به کمک این مدل‌ها تشریح شده است. به طور خلاصه این کمیت‌ها با روابط (۱۳) تا (۱۵) تعیین می‌شوند [۱].

$$MTTF_s = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{(3\lambda_c + \mu_c)}{3\lambda_c^2} \quad (13)$$

$$A_s = \frac{\mu_c(\mu_c + 2\lambda_c)}{\mu_c^2 + 2\lambda_c(\mu_c + \lambda_c)} \quad (14)$$

$$R_s(t) = e^{-\frac{3\lambda_c^2}{(3\lambda_c + \mu_c)}t} \quad (15)$$

## ۷- شرایط انجام تحقیقات

برای دستیابی به نتایج مورد نظر تحقیقات در پنج حالت مختلف با این فرض که سیستم مورد مطالعه در پنج نوع شرایط محیطی متفاوت به شرح زیر کار می‌کند، انجام شده و با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. این شرایط محیطی به شرح زیر می‌باشند:

(۱)  $G_B$ : زمینی، کنترل شده، ثابت (مانند محیط آزمایشگاه)

(۲)  $G_M$ : زمینی و متحرک (مانند خودرو)

(۳)  $A_{IC}$ : هوایی و سرپوشیده (مانند کابین خلبان)

(۴)  $A_{RW}$ : هلی کوپتر



( $M_L$ ) : شرایط پرتاب موشک

جدول (۴): تعداد و میانگین نرخ خرابی قطعات ( $\text{Failure}/10^6 \text{ Hours}$ )

ردیف	نام المان	N	$\lambda_{GB}$	$\lambda_{GM}$	$\lambda_{AIC}$	$\lambda_{ARW}$	$\lambda_{MI}$
۱	Microcircuits	246	0.063	0.500	0.500	1.006	1.512
۲	Semiconductors	70	0.215	1.932	2.795	5.16	6.88
۳	Resistors	228	0.061	0.971	1.098	3.823	5.280
۴	Capacitors	316	0.020	0.396	0.238	0.792	0.990
۵	Connectors	34	0.048	0.383	0.144	0.910	1.293
۶	PCB Boards	10	0.749	5.244	3.745	14.234	20.227
۷	Inductive Devices	16	0.065	0.783	0.390	1.566	2.216

جدول ۵: نرخ خرابی زیرسیستم های یک کامپیوتر کنترل پرواز ( $\text{Failures}/10^6 \text{ Hours}$ )

No.	نام زیر سیستم	شرایط محیطی				
		$G_B$	$G_M$	$A_{IC}$	$A_{RW}$	$M_L$
۱	برد پردازشگر	8.858	80.779	75.054	195.461	279.255
۲	برد ارتباط سریال	3.063	32.833	25.523	77.253	106.249
۳	برد مبدل	5.714	59.152	58.886	160.607	226.252
۴	برد منبع تغذیه	13.88	159.777	182.41	469.236	637.441
۵	برد زیرین	1.878	26.668	21.626	80.223	109.000
۶	پنل	1.928	21.177	20.324	49.765	71.0585

## ۸- ارائه نتایج

در این بخش نتایج به دست آمده در زمینه تخمین توابع نرخ خرابی، قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی سیستم کنترل پرواز و کامپیوترها و سایر زیرسیستم های موجود در آن، ارائه می شوند. بعضی از نتایج و نمودارهای به دست آمده که در این بخش ارائه می شوند عبارتند از:

**الف- نرخ خرابی قطعات:** با توجه به اینکه سیستم کنترل پرواز از حدود دو هزار قطعه تشکیل شده است، امکان ارائه مقادیر نرخ خرابی کلیه قطعات آن در پنج حالت مذکور، در این مقاله میسر نیست. لذا فقط تعداد و مقدار میانگین نرخ خرابی بعضی از انواع مختلف قطعات این مجموعه در جدول (۴) ارائه شده اند. نتایج موجود در جدول (۴) نشان می دهند که شرایط محیطی تاثیر بسیار زیادی در تعیین نرخ خرابی قطعات الکترونیکی دارد. به طور مثال میانگین نرخ خرابی بردهای PCB این کامپیوتر صنعتی چنانچه در شرایط محیطی  $M_L$  کار کند، 19 برابر بیشتر و  $MTTF$  آن به همین نسبت کمتر از حالتی است که در شرایط محیطی  $G_B$  کار کند.

**ب- نرخ خرابی،  $MTTF_C$  و احتمال عدم دسترسی به کامپیوترهای کنترل پرواز:** در جدول (۵) نتایج تخمین نرخ خرابی زیرسیستم های موجود در کامپیوترهای کنترل پرواز و در جدول (۶) نتایج مربوط به تخمین نرخ خرابی و میانگین زمان تا خرابی آنها ارائه شده اند. نتایج موجود در جدول (۶) تاثیر شرایط محیطی کار قطعات را در تعیین قابلیت اطمینان و نرخ خرابی سیستم های الکترونیکی نشان می دهند. به طور مثال نرخ خرابی یک کامپیوتر کنترل پرواز هنگامی که در شرایط محیطی  $M_L$  کار می کند، 40.47 برابر بیشتر

و  $MTTF$  آن به همین نسبت کمتر از حالتی است که در شرایط محیطی  $G_B$  کار کند. اما مقدار این کمیت ها در شرایط محیطی  $G_M$  و  $A_{IC}$  تقریباً یکسان است.

پ- نرخ تعمیر و  $MTTR_C$  کامپیوترهای کنترل پرواز: در مرجع [۴] نحوه پیشگویی این کمیت ها تشریح و نتایج به دست آمده در مورد کامپیوترهای کنترل پرواز ارائه شده است. این نتایج به شرح زیر می باشد:

جدول ۶: نرخ خرابی و  $MTTF_C$  یک کامپیوتر کنترل پرواز

کامپیوتر صنعتی	شرایط محیطی				
	$G_B$	$G_M$	$A_{IC}$	$A_{RW}$	$M_L$
نرخ خرابی (Failure/10 <sup>6</sup> Hours)	35.317	380.386	383.827	1032.545	1429.256
$MTTF_C$ (Hours)	28314.98	2628.91	2605.34	968.48	699.66
$\bar{A}_C$ (Percent)	0.00101194	0.01089812	0.0109967	0.02957709	0.0409364

جدول ۷: نرخ خرابی،  $MTTF_S$  و قابلیت دسترسی سیستم کنترل پرواز

کامپیوتر صنعتی	شرایط محیطی				
	$G_B$	$G_M$	$A_{IC}$	$A_{RW}$	$M_L$
$\lambda_S$ (Failure/10 <sup>6</sup> Hours)	0.008706	1.009961	1.028316	7.441721	14.258554
$MTTF_S$ (Hours)	114862156.74	990137.54	972464.00	134377.51	70133.34
$\bar{A}_C$ (Percent)	0.00000025	0.00002894	0.0000295	0.00021323	0.0004085

$$MTTR_C = \frac{1}{\mu_C} = 3.940 \text{ (Hours)}$$

ت- نرخ خرابی،  $MTTF_S$  و احتمال عدم دسترسی به سیستم کنترل پرواز: این کمیت ها به کمک روابط (۱۳) و (۱۴) و داده های موجود در جدول (۶) محاسبه شده و در جدول (۷) ارائه شده اند.

ث- توابع قابلیت اطمینان و چگالی تجمعی احتمال خرابی: در مورد کامپیوترهای کنترل پرواز، این توابع را می توان با استفاده از نتایج به دست آمده در جدول (۶) و معادله (۶) در چهار حالت مختلف به دست آورد. به طور مثال در شرایط محیطی  $A_{IC}$  این توابع، با رابطه (۱۱) مشخص می شود.

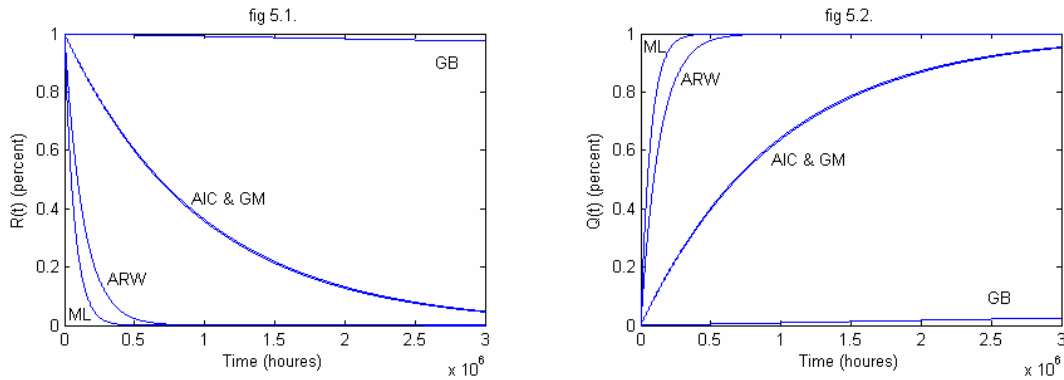
$$R_C(t) = 1 - Q_C(t) = \text{Exp}(-0.000383827 t) \quad (16)$$

تابع قابلیت اطمینان سیستم کنترل پرواز با جایگزینی نتایج به دست آمده در جدول (۶) در رابطه (۱۵) به دست آمده و در جدول (۷) ارائه شده اند. به طور مثال در شرایط محیطی  $A_{IC}$  این کمیت با روابط (۱۷) تعیین می شوند.

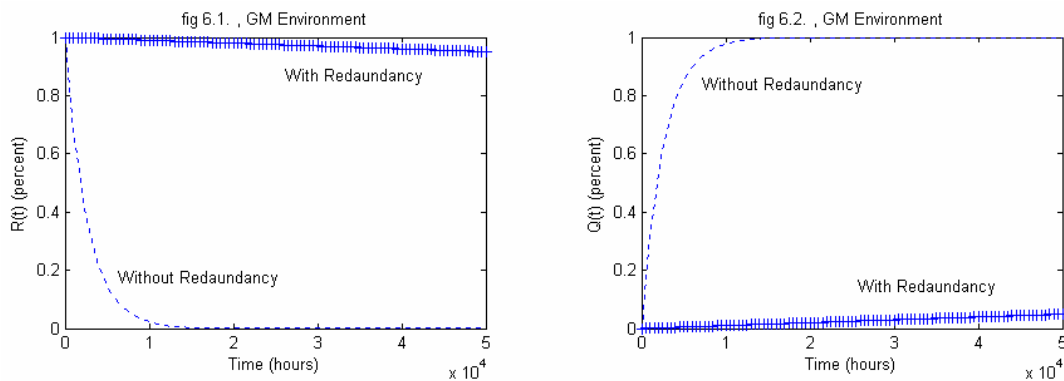
$$R_S(t) = \exp(-0.000001 t) \quad (17)$$

در شکل (۵) توابع قابلیت اطمینان و چگالی تجمعی احتمال خرابی برای ۳۰۰۰۰۰۰ ساعت کار سیستم کنترل پرواز، هنگامی که در شرایط محیطی  $G_B$ ،  $G_M$ ،  $A_{RW}$  و  $M_L$  کار می کند، رسم شده اند. این شکل تاثیر زیاد شرایط محیطی را در تعیین قابلیت اطمینان و احتمال خرابی این سیستم نشان می دهد. مثلاً قابلیت اطمینان این سیستم پس از ۳۰۰۰۰۰۰ ساعت کار، در شرایط محیطی  $G_B$  (99.74%)، در شرایط محیطی  $G_M$  (73.87%)، در شرایط محیطی  $A_{IC}$  (73.46%)، در شرایط محیطی  $A_{RW}$  (10.73%) و در شرایط محیطی  $M_L$  (1.39%) است.

ج- تاثیر افزونگی در رشد قابلیت اطمینان سیستم: در شکل (۶) تاثیر استفاده از یک کامپیوتر افزون در رشد قابلیت اطمینان و کاهش احتمال خرابی سیستم کنترل پرواز، در شرایط محیطی  $G_M$  نشان داده شده است. به طور مثال قابلیت اطمینان این سیستم پس از ۵۰۰۰ ساعت کار، در این شرایط به میزان (۸۱.۵٪) بیشتر و احتمال خرابی آن به همین میزان کمتر از حالتی است که در آن افزونگی موازی وجود نداشته باشد. همچنین در این حالت پس از استفاده از افزونگی میزان احتمال عدم دسترسی به سیستم کنترل پرواز نسبت به حالتی که در آن از افزونگی استفاده نشود، حدوداً به میزان ۳۷۶ برابر کاهش یافته است.



شکل (۵): توابع قابلیت اطمینان و چگالی تجمعی احتمال خرابی سیستم کنترل پرواز برحسب شرایط محیطی



(+++ : وجود یک افزونگی موازی، --- : بدون افزونگی)

شکل (۶): تاثیر کاربرد افزونگی موازی در رشد قابلیت اطمینان و کاهش احتمال خرابی سیستم کنترل پرواز

## ۹- ارائه پیشنهاد

هنوز در ایران سند مشخصی جهت تعیین نرخ خرابی قطعات الکترونیکی و ضریب شرایط محیطی متناظر با آنها وجود نداشته و در این زمینه از منابع و استانداردهای خارجی استفاده می شود. با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از قطعات مورد استفاده در تجهیزات صنعتی و نظامی ایران مطابق با این استانداردها تولید نمی شوند، به کمک این استانداردها نمی توان با دقت نرخ خرابی و ضریب شرایط محیطی قطعات، و در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم ها را تخمین زد. بنابراین با توجه به اهمیت وجود داده های صحیح نرخ خرابی قطعات، در تعیین عمر مفید و قابلیت اطمینان سیستم ها، پیشنهاد می شود:

۱- سند مشخصی جهت تعیین نرخ خرابی قطعات الکترونیکی مورد استفاده در تجهیزات صنعتی و نظامی ایران تدوین شده و در آن ضریب شرایط محیطی کار قطعات تعیین شود.

۲- در این سند دقیقاً مشخص شود که هر قطعه برای داشتن نرخ خرابی و ضریب شرایط محیطی خاص، باید چه مشخصاتی داشته و چه تست‌هایی را پشت سر بگذارد.

تدوین چنین سندی باعث می‌شود بتوانیم سیستم‌هایی که دارای قابلیت اطمینان مورد نظر باشند را تولید کرده و هزینه‌های طراحی، تولید، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری آنها را بهینه‌سازی کنیم.

### ۱۰- نتیجه‌گیری

نتایج تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهند که شرایط محیطی کار قطعات تاثیر زیادی در تعیین میانگین عمر مفید، قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی سیستم‌ها دارد. بنابراین شاخص‌های مربوط به قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی به سیستم‌ها در شرایط محیطی مختلف متفاوت می‌باشند. به طور خلاصه می‌توان گفت هر چه شرایط محیطی کار یک قطعه مناسب‌تر باشد، ضریب شرایط محیطی و نرخ خرابی آن کمتر و قابلیت اطمینان و عمر مفید و قابلیت دسترسی آن بیشتر خواهد بود. میزان تغییرات قابلیت اطمینان بر حسب شرایط محیطی در سیستم‌های مختلف متفاوت بوده و باید تخمین زده شود.

### ۱۱- تقدیر و تشکر

در اینجا بر خود لازم می‌دانیم از حمایت‌های مسئولین محترم سازمان صنایع هوافضا و صنایع ثامن الائمه(ع)، که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند، تشکر و قدردانی نماییم.

### مراجع

- [1] Elsayed A. Elsayed, "Reliability Engineering", Adison wesley longnan Inc., Copyright 1996.
- [2] J. R. Skarloff, "Redundancy Management Techniques for space shuttle computers", IBM J. RES. DEVELOP, January 1976.
- [3] Richard P. Feynman, "Personal Observation on the reliability of the shuttle", <http://www.freerepublic.com/focus/news/834070/posts>.
- [۴] فاضل، صادق و پیروی، علی، " تخمین MTTR سیستم‌های کامپیوتری به روش شبیه‌سازی مونت کارلو و مقایسه آن با روش‌های تحلیلی"، سیزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، مجموعه مقالات کامپیوتر، MAY 2005.
- [۵] فاضل، صادق و پیروی، علی، " بررسی تاثیر مجتمع سازی سیستم‌های الکترونیکی در رشد شاخص‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و قابلیت دسترسی آنها"، سیزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، مجموعه مقالات الکترونیک، MAY 2005.
- [۶] پیروی، علی و فاضل، صادق، "تخمین میانگین عمر مفید یک نوع کامپیوتر صنعتی به روش مونت کارلو و ارائه راهکار جهت افزایش آن"، دوازدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، مجموعه مقالات کامپیوتر، MAY 2004.
- [۷] فاضل، صادق، " تخمین قابلیت اطمینان یک سیستم صنعتی خاص به روش شبیه‌سازی مونت کارلو"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد برق، دانشگاه فردوسی مشهد، دی ۱۳۸۰.
- [۸] پیروی، علی و شریف یزدی، امیر، " ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه تولید و انتقال برق شمال خراسان"، نشریه دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، سال ۲۸، سال ۱۱، سال ۱۳۷۵.
- [9] A. Birolini, "Reliability Engineering, Theory and Practice", Springer, 1999.
- [10] Endrenyi, "Reliability Modeling in Electric Power Systems", John wiley & sons, 1978.
- [11] David J. Klinger and Yoshinao Nakada and Maria A. Menendez , " AT&T Reliability Manual", Copyright 1990 by AT&T.



[12] MIL-HDBK-217F, "Reliability Prediction of Electronic Equipment", Notice2, D.O.D., February 1995.

[13] William Denson, William Crowel, Paul Jaworski, David Mahar, "EPRD-97: Electronic Parts Reliability Data", D.O.D., Reliability Analysis Center(RAC), 1997.

[۱۴] اسناد و کاتالوگ های موجود در زمینه شنا سایی سیستم مورد مطالعه و قطعات آن.