قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری سیستم‌های دارای افزونگی با رویکرد مدل مارکوف

قنبر عباس‌پور اسفدن

(نویسنده مسئول)استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب *

چکیده :

در این پژوهش با استفاده از مدل مارکوف ، فرمول عمومی محاسبه قابلیت اطمینان[1] و MTTF[2] که از عوامل اصلی مهندسی در کیفیت می‌باشند در سیستم‌های دارای افزونگی ۱ از n ، از دو روش حل معادلات دیفرانسیل و روش میانبر (محاسبه مستقیم MTTF بدون نیاز به تابع قابلیت اطمینان با استفاده از ماتریس‌های گذار در مدل مارکوف) بدست آمده که بعضی در مقاله نیز به طور مختصر اشاره شده است . از نتایج قابل توجه این پژوهش اینکه امکان برآورد پارامترها برای هر تعداد n دلخواه، تسهیل گردیده است . همچنین با استفاده از توابع بدست آمده، میزان تاثیر افزایش اقلام افزونه بر ارتقای قابلیت اطمینان، در این سیستم‌ها (با حالت‌های آماده به خدمت و فعال و اجزاء تعمیرپذیر و غیرقابل تعمیر) ، در کنار عواملی مانند نرخ تعمیرات و قابلیت اطمینانِ سیستم‌های سوئیچینگ ، مورد ارزیابی قرار گرفته است . جهت انجام محاسبات و تحلیل داده ها نیز از نرم افزار Mathematica استفاده شده است .

کلمات کلیدی : مارکوف، قابلیت اطمینان ، افزونگی، نرخ خرابی .

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۶ / تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۱

دوره ۱۰ / شماره ۱

صفحات:۸۵-۷۵

*(Corresponding author) gh_abbaspour@azad.ac.ir

[1] Reliability

[2] Mean Time To Failure

۱- مقدمه

یکی از پارامترهای مهم در طراحی محصولات ، میزان قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری[3] آنها در طی دوره فعالیت مورد انتظارشان میباشد. در تمامی سیستمهای مهندسی اعم از سیستمهای نیروگاهی ، صنایع هوافضا ، صنایع پتروشیمی ، نفت و گاز و تجهیزات هسته ای ، قابلیت اطمینان ، یک ویژگی بسیار مهم در طراحی و بهره برداری کوچکترین و ساده ترین زیرسیستمها تا بزرگترین و پیچیده ترین سیستمها است.

در کارخانجات تولیدی ، قابلیت دسترسی تجهیزات یکی از پارامترهای تعیین اثربخشی کلی تجهیزات (OEE[4]) می باشد ، این مساله در خطوط مونتاژ و سیستم های تولید پیوسته ، مانند صنایع فولاد یا صنایع شیمیایی که در آنها هر ساعت توقف در فرآیند به علت بروز عیب ، موجب وارد آمدن خسارت های بزرگ مالی ، جانی و آلودگی محیط زیست می شود ، بیشتر حائز اهمیت است. در بسیاری از صنایع ، از کار افتادن المانها و زیرسیستمها ، موجب بروز اختلال در سطوح مختلفی میشود که نه تنها میتواند منجر به خسارتهای مالی و جانی سنگینی گردد ، بلکه تهدید شدیدی برای جامعه و محیط زیست نیز تلقی می شود. در برخی سیستم های ویژه ماموریت[5] ، بروز یک خطا در اجزای سیستم موجب از کار افتادن تمامی سیستم و شکست ماموریت می گردد (مانند انفجار فضاپیمای چلنجر در سال ۱۹۸۶ به دلیل شل بودن پیچ نگهدارنده مخزن سوخت فضا پیما) . از اینرو مهندسان و مدیران فنی می بایست در طراحی و تولید محصولات و سیستمهای پایای اطمینان بخش ، کوشا باشند .

بیان مساله و ضرورت

با توجه به وجود محدودیت در استفاده از افزونگی به منظور ارتقای قابلیت اطمینان سیستم ها ، مساله اصلی در این پژوهش تعیین میزان تاثیر تعداد افزونگی بر میزان قابلیت اطمینان ، زمان عملکردی مورد انتظار بوده ، لذا ارزیابی پارامترهای قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری در سیستمهای دارای افزونگی ۱ از n ضروری میباشد .

با وجود اینکه استفاده از افزونگی یکی از راههای بالا بردن قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری سیستم ها می باشد ، لکن این موضوع باعث مشکلاتی مانند افزایش هزینه ، پیچیدگی و یا وزن سیستم می گردد . این موضوع بخصوص در سیستم های ماموریت محور (همانند سامانه های فضایی و یا برخی سامانه های نظامی) بسیار حائز اهمیت می باشد . از اینرو **هدف اصلی** تحقیق یافتن میزان تاثیر تعداد افزونگی ها در افزایش قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری که باعث بهینه شدن طراحی و کاهش مشکلات مذکور نیز شده ، می باشد . به عبارت دیگر ، نتایج این پژوهش می تواند به مهندسین و نوآوران در طراحی بهینه سیستم ها از دیدگاه قابلیت اطمینان ، یاری رساند . همچنین ، در این پژوهش نشان دادن کارآمدی مدل مارکوف و نحوه کاربرد آن در ارزیابی پارامترهای مذکور و ارائه یک روش تسهیل کننده محاسبات ، مدنظر قرار گرفته است . **سوال اصلی** تحقیق نیز این است که آیا افزایش تعداد افزونگی ها لزوماً منجر به افزایش قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری در سیستم ها (تعمیرپذیر و تعمیر ناپذیر) می گردد؟ توجه شود چون این موضوع مبتنی بر مدل مارکوف می باشد، فرضیه درنظر گرفته نشده و سوال پژوهش با استفاده از معادلات استخراج شده و ماتریس های گذار در مدل مارکوف ، بررسی و پاسخ داده شده است .

جنبه نوآوری

موضوع پژوهش قبلا در خصوص برخی سیستم ها با حالتهای خاص (مانند افزونگی های خاص ، تعمیرپذیر یا تعمیر ناپذیر) مورد بررسی قرار گرفته است . در این پژوهش سعی شده تا دامنه شمول آن بیشتر گردیده و همزمان ، قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری سیستم های مذکور در حالتهای متفاوت افزونگی و وضعیت تعمیر

[3] Availability
[4] Overall Equipment Effectiveness
[5] Mission Oriented Systems

پذیری و تعمیرناپذیری مورد ارزیابی قرار گیرند . همچنین با ارائه و مقایسه مفاهیم و تعاریف ارائه شده در منابع مختلف با هدف رفع ابهامات و استفاده درست و مناسب از مفاهیم و روش های ارزیابی ، جامعیت بررسی موضوع نسبت به سایر پژوهش های انجام شده در داخل کشور ، در این پژوهش بیشتر می باشد .

تعاریف ضروری

قابلیت اطمینان[۶] – احتمال اینکه یک سیستم بتواند ماموریت مورد نظر را تا زمان مشخص و تحت شرایط عملکردی خاص با موفقیت انجام دهد . [۱]

دسترسی پذیری[۷] – قابلیت دسترسی ، احتمال اینکه سیستم بتواند کار مشخص شده را در شرایط و زمان مشخص شده انجام دهد. به عبارت دیگر درصدی از اوقات است که سیستم عملیاتی است. [۲]

میانگین زمان تا خرابی MTTF[۸]– میانگین زمانی است که سیستم کار می کند قبل از اینکه یک خرابی را تجربه نماید. [۳]

میانگین زمان بهره برداری بین خرابی ها MTBF [۹] – فاصله زمانی بین دو خرابی است، یعنی فاصله زمانی خاتمه تعمیر یک خرابی (بازگشت به حالت عملکرد) تا وقوع خرابی بعدی است. [۳]

میانگین زمان تا تعمیر MTTR [۱۰]– زمان میانگین موردنیاز برای تعمیر یک سیستم (قطعه) خراب که شامل زمانهای مورد نیاز برای تشخیص خرابی تا تعمیر و بازگشت سیستم به حالت عملیاتی می گردد. [۴]

[6] Reliability
[7] Availability
[8] Mean Time To Failure
[9] Mean Time Between Failures or Mean Operating Time Between Failures
[10] Mean Time To Repair

ازکارافتادگی، خرابی و یا شکست[۱۱] - بدین معناست که سیستم کاری را که قرار بوده انجام دهد در اثر وقوع خطا در آن ، انجام نمی دهد . [۵]

سیستم های دارای افزونگی

برای ساختن یک سیستم قابل اطمینان دو روش عمده وجود دارد [۶] :

۱- سیستم را با اجزا و زیرسیستم های باکیفیت بسازیم .

۲- اجزای سیستم را افزونه کنیم (از افزونگی در سیستم استفاده کنیم) .

۲- پیشینه پژوهش – در سالهای اخیر ملاحظه می کنیم که کارخانه ها ، ماهواره ها ، رایانه ها و سامانه های اطلاعاتی مرتب بزرگتر و پیچیده تر می شوند بطوری که خیلی از آنها در یک نقطه یا مکان قرار نگرفته و در بخش های مختلف جغرافیایی پخش شده اند . به همین خاطر ، از کارافتادگی آنها می تواند خسارات جدی و فاجعه آمیزی را بدنبال داشته باشد . درست به همین دلیل ، نظریه قابلیت اطمینان و نگهداری و تعمیرات برای نگهداشت آنها در پرتو توجه به حساسیت های زیست محیطی و مشکلات زندگی ایمن و سالم تر انسان ها ، اهمیت بیشتری پیدا می کند .

روند توسعه و گسترش صنایع پیشرفته با انبوهی از حجم تولیدات صنعتی در عصر حاضر ، نیاز هرچه بیشتر به اجرای روش های پیشگویانه در مقابله با خرابی های احتمالی را آشکار می کند . این ضرورت بخصوص در صنایع تولید کننده ای که ارزش حقیقی محصول تولید شده ، حجم عظیمی از دارایی های بالقوه آنها را تشکیل می دهد ، نظیر شرکت های هواپیما سازی بیشتر مشهود می باشد . محصولات مهندسی مدرن از تک تک قطعات تا سامانه های بزرگ باید بگونه ای طراحی و تولید شوند که

[11] Failure

در طول مدت ماموریت خود از قابلیت اطمینان لازم برخوردار باشند . [۲]

تا دهه ۱۹۶۰ فرض بر این بود که اگر محصول ، زمانی که از دست سازنده خارج میشود عاری از عیوب یا وقوع خرابی های سیستماتیک باشد ، اهداف کیفیت کسب شده اند . پیچیدگی رو به افزایش تجهیزات و سیستم ها و همچنین هزینه های رو به رشدی که در نتیجه وقوع خرابی ها با از دست دادن بهره‌برداری ایجاد می شود ، سبب اهمیت یافتن وجوه قابلیت اطمینان ، قابلیت نگهداری ، دسترسی پذیری و ایمنی شده است . امروز انتظار می‌رود که تجهیزات و سیستمهای پیچیده نه تنها در زمان شروع به کار عاری از عیوب و وقوع خرابی های سیستماتیک باشند ، بلکه در بازه زمانی معینی وظیفه الزامی را ، عاری از وقوع خرابی انجام دهند . با این حال نمی توان بر اساس آزمونهای انطباق ، به این پرسش که آیا قلمی[۱۲] معین در طی یک دوره زمانی معین ، بدون خرابی کار می کند ، پاسخ مثبت یا منفی داد . تجربه نشان داده که تنها احتمالی از وقوع را می توان نشان داد . این احتمال مقدار قابلیت اطمینان قلم یاد شده است. [۷]

فجایع مهم مهندسی در سالهای اخیر مانند نشت نفت در خلیج مکزیک در سال ۲۰۱۰ ، فاجعه نیروگاه فوکوشیما در سال ۲۰۱۱ و قطع برق در هند که بر زندگی حدود۳۰۰ میلیون نفر تاثیر گذاشت ، منجر به افزایش توجه به اهمیت حیاتی مطالعات قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری سیستم های مهندسی گردید . [۸]

۳- روش پژوهش

در اجرای این پژوهش، در انجام مدلسازی ، فرض های زیر مدنظر قرار گرفته است :

۱- مدل مورد استفاده ، مدل مارکوف همگن پیوسته می باشد .

۲- نرخ خرابی و تعمیر، ثابت و برای همه اجزاء ، یکسان درنظر گرفته شده است .

۳- در سیستم های قابل تعمیر ، **یک** گروه تعمیردرنظر گرفته شده به گونه ای که در هر بازه زمانی Δt فقط امکان تعمیر و بازیابی یک ماژول خراب وجود داشته و ماژول ها پس از تعمیر در حد نو فرض می شوند .

۴- در سیستم های قابل تعمیر ، تعمیرات فقط در سطح زیر سیستم ها در نظر گرفته شده و درصورت خرابی کلی سیستم ، امکان تعمیر درنظر گرفته نشده است .

۵- سیستم در یک زمان نمی تواند در بیش از یک حالت قرار داشته باشد .

۶- سیستم در ابتدای فعالیت $(t = 0)$ سالم است .

در این پژوهش به منظور تعیین قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری از تکنیک های ریاضی بر مبنای مدل مارکوف (بدلیل قابلیت مدلسازی مناسبتر نسبت به سایر روش های تحلیلی) استفاده شده است ، با این هدف که در هر یک از حالت های افزونگی مورد نظر ، تا حد امکان روش های تعیین قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری ، برای تعداد مختلف افزونگی ها در هر حالت ، فرموله شده و بر مبنای فرمول بدست آمده ، نمودارهای مختلف بر اساس تعداد افزونگی ، نسبت های نرخ خرابی و تعمیرپذیری متفاوت ، رسم و نتایج مورد تحلیل قرار گیرند . این ارزیابی بر روی دو نوع سیستم پایه افزونگی (افزونگی های فعال و آماده به خدمت ۱ از n) انجام شده است. مبنای کار استفاده از مدل فرآیند مارکوف (مارکوف پیوسته) می باشد . بر اساس این مدل ، محاسبات به صورت همزمان از دو روش محاسبه مستقیم MTTF با استفاده از ماتریس های گذار مارکوف ، بدون نیاز به محاسبه قابلیت اطمینان (روش میانبر) و همچنین روش پایه ای ، یعنی محاسبه قابلیت اطمینان سیستم با حل معادلات دیفرانسیل حالت های حاصل از مدلسازی مارکوف و سپس استخراج پارامتر MTTF از آن (به منظور صحه گذاری نتایج روش اول) استفاده شده است . باتوجه به تجانس قابلیت اطمینان و MTTF، به منظور تسهیل محاسبات ، این پارامتر با استفاده از روش فوق الذکر محاسبه شده است . قابل ذکر

[۱۲] واحدی است وظیفه ای یا ساختاری شامل یک یا چند جزء

است در خصوص سیستم های قابل تعمیر از پارامتر MTBF به جای MTTF استفاده شده است .

۴- بحث ، تحلیل داده ها و نتیجه گیری

گردآوری داده ها

جهت جمع آوری اطلاعات مربوط به ادبیات موضوع و پیشینه تحقیق از کتابها ، پایان نامه ها ، نشریات ، مقالات داخلی و خارجی و نظر خبرگان استفاده شده است .

مختصرمورد لزوم مبانی ریاضی محاسبه قابلیت اطمینان ، MTTF و MTBF

در بسیاری از موارد عملی ، لازم است تا بجای تعیین احتمال وقوع از کار افتادن در یک فاصله زمانی ، احتمال بقای آن مورد ارزیابی قرار گیرد . [۷] از آنجایی که دو رخداد از کار افتادن و بقا ، رخدادهایی مکمل هستند ، هرگاه تابع توزیع فراوانی بقا را با R(t) نشان دهیم ، داریم:

$$R(t)=1-Q(t)$$

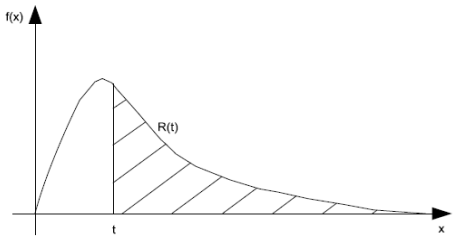
مشتق تابع توزیع فراوانی تجمعی برای یک متغیر پیوسته (مانند زمان) ، تابع چگالی احتمال را به دست می دهد . بنابراین با مشتق گیری از تابع توزیع فراوانی از کار افتادن Q(t) ، تابع چگالی احتمال آن f(t) بر حسب زمان بدست می آید :

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

در شرایطی که پارامتر λ مستقل از زمان و مقدار ثابتی باشد :

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

این شکل از تابع به نام تابع توزیع نمایی شناخته میشود . قابلیت اطمینان سطح زیر منحنی f(t) از t تا بینهایت است. مطابق شکل (۲-۱) :



شکل ۲-۱) نمایش گرافیکی قابلیت اطمینان [۸]

اغلب اوقات نرخ ثابت (مستقل از زمان) وقوع خرابی (λ) برای سیستم های قابل تعمیر نیز مفروض است با این فرض که پس از تعمیر "به خوبی نو" در نظر گرفته شوند . در این حالت ، زمان های عاری از وقوع خرابی پی در پی ، متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع نمایی و پارامتر λ یکسان بوده و دارای میانگین زیر می باشد :

$$MTBF = {}^{1}/_{\lambda}$$

و در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم برابر است با :

$$R(t) = e^{(\frac{-t}{MTBF})}$$

در کاربردهای عملی ، میانگین زمان بهره برداری بین وقوع خرابی ها (MTBF) بایستی فقط به اجزای قابل تعمیر با نرخ وقوع خرابی ثابت محدود شود . [۷]

مدل مارکوف

مدل مارکوف توسط ریاضیدان بنام روسی ، آندری مارکوف[۱۳] (۱۸۵۶-۱۹۲۲) ابداع گردید. مارکوف را بیشتر به خاطر مطالعاتش در زنجیره مارکوف می شناسند [۱۱] . این زنجیره، توالی متغیرهای تصادفی هستند که در آنها، متغیر آینده با استفاده از متغیر حال تعیین شده اما مستقل از مسیری است که وضعیت حال، از وضعیت قبلی به آن رسیده است. بدلیل پیچیدگی های محاسباتی در مدل مارکوف، استفاده از کامپیوتر یکی از نیازهای ضروری است. نرم افزارهای متعددی نیز در این خصوص وجود دارد . [۱۲]

ارزیابی قابلیت اطمینان ، MTTF وMTBF در سیستم هایی با افزونگی آماده به خدمت ۱ از n

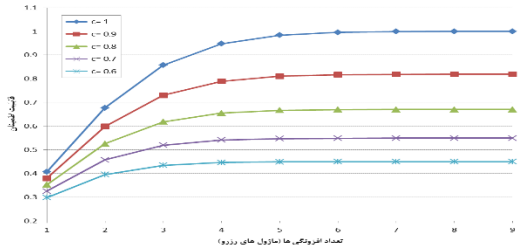
[13] Andre Markov

قابلیت اطمینان (سیستم غیرقابل تعمیر)

مطابق محاسبات انجام شده قبل ، فرمول عمومی قابلیت اطمینان سیستم هایی با افزونگی آماده به خدمت ۱ از n غیر قابل تعمیر (با فرض نرخ خرابی ثابت و عملکرد سوئیچ غیر ایده آل) به شکل زیر می باشد :

$$R(t) = (\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{i!}(\lambda ct)^i)e^{-\lambda t}$$

برای نمایش تاثیر تعداد عناصر افزونه و احتمال خرابی سوئیچ در قابلیت اطمینان کل سیستم ، نمودار قابلیت اطمینان ، با تعداد متفاوت ماژول های افزونه و در پنج حالت مختلف احتمال موفقیت سوئیچ ، با فرض $\lambda =$ 0.001 و t=2000 ، مطابق شکل (۲-۲) نمایش داده می شود. (می توان نشان داد که با فرض اعداد دیگری برای t و نرخ خرابی ، شکل کلی و روند نمودارها تغییر قابل توجهی نداشته و فقط اعداد قابلیت اطمینان ، متفاوت خواهد شد). مقادیر عددی متناظر در جدول (۲-۱) ارائه شده است .



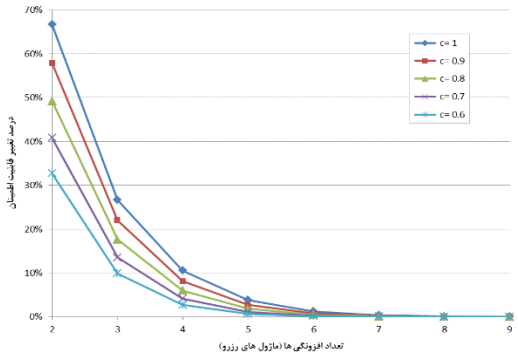
شکل ۲-۲) نمودار قابلیت اطمینان سیستم دارای افزونگی آماده به خدمت ۱ از n

جدول ۲-۱) مقادیر قابلیت اطمینان سیستم دارای افزونگی آماده به خدمت ۱ از n

تعداد افزونه	قابلیت اطمینان (R)				
	C=1	C=0.9	C=0.8	C=0.7	C=0.6
۱	0.40601	0.37894	0.35187	0.32480	0.29774
۲	0.67668	0.59818	0.52510	0.45743	0.39518
۳	0.85712	0.72973	0.6175	0.51933	0.43416
۴	0.94734	0.78892	0.65444	0.54099	0.44585
۵	0.98343	0.81023	0.66627	0.54705	0.44865
۶	0.99547	0.81663	0.66942	0.54847	0.44922
۷	0.99890	0.81827	0.67014	0.54875	0.44931
۸	0.99976	0.81864	0.67029	0.54880	0.44933
۹	0.99995	0.81871	0.67032	0.54881	0.44933

همانگونه که از نمودار نیز مشخص است ، حالت ایده آل سوئیچ ، باعث ایجاد بالاترین قابلیت اطمینان شده و هرچه احتمال موفقیت آن کاهش یابد ، قابلیت اطمینان سیستم کاهش می یابد . با اینکه افزایش تعداد افزونه ها باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می گردد ولی باید در نظر داشت که استفاده از سوئیچ با قابلیت اطمینان بالاتر ، تاثیر بیشتری از افزایش تعداد افزونه ها در ارتقای قابلیت اطمینان سیستم دارد . مثلا قابلیت اطمینان در یک سیستم دارای دو ماژول افزونه ، با کلید ایده آل ، بیشتر از سیستم هایی با تعداد افزونه های بیشتر و سوئیچ غیر ایده آل می باشد .

در شکل (۲-۳) ، نمودار نسبت تغییرات قابلیت اطمینان با افزایش تعداد ماژول های افزونه نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش ماژول های افزونه ، درصد افزایش قابلیت اطمینان کاهش می یابد تا جایی که دیگر افزایش افزونه ها ، تاثیر قابل توجهی در ارتقای قابلیت اطمینان سیستم ندارد . (مقادیر عددی متناظر در جدول (۲-۲) آورده شده است) .



شکل ۲-۳) نمودار نسبت تغییر قابلیت اطمینان سیستم به تعداد افزونگی ها

جدول ۲-۲) نسبت تغییر قابلیت اطمینان سیستم به تعداد افزونگی ها در سیستم های دارای افزونگی

تعداد افزونه ها	درصد افزایش قابلیت اطمینان				
	C=1	C=0.9	C=0.8	C=0.7	C=0.6
۲	66.667 %	57.857 %	49.231 %	40.833 %	32.727 %
۳	26.667 %	21.991 %	17.595 %	13.530 %	9.863%
۴	10.526 %	8.112%	5.985%	4.171%	2.693%
۵	3.810%	2.701%	1.807%	1.121%	0.630%
۶	1.223%	0.789%	0.473%	0.259%	0.125%
۷	0.345%	0.201%	0.108%	0.052%	0.021%

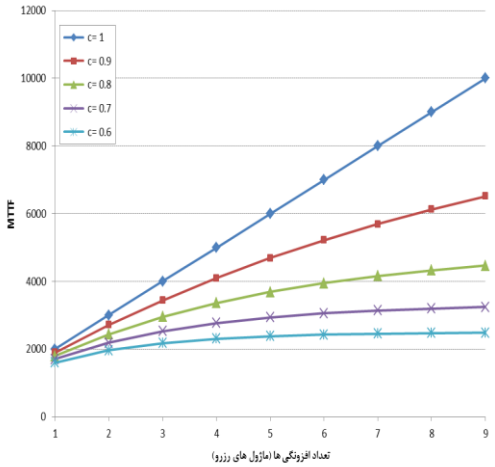
۸	0.086%	0.045%	0.022%	0.009%	0.003%
۹	0.019%	0.009%	0.004%	0.001%	0.001%

MTTF (سیستم های غیرقابل تعمیر)

فرمول عمومی MTTF سیستم هایی با افزونگی آماده به خدمت ۱ از n غیر قابل تعمیر (با فرض نرخ خرابی ثابت و عملکرد سوئیچ غیر ایده آل) به شکل زیر می باشد :

$$MTTF = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{c^i}{\lambda}$$

برای نمایش تاثیر تعداد عناصر افزونه و احتمال خرابی سوئیچ در MTTF کلی سیستم ، نمودار MTTF ، براساس تعداد متفاوت ماژول های افزونه و در پنج حالت مختلف احتمال موفقیت سوئیچ ، با فرض $\lambda = 0.001$ ، مطابق شکل (۲-۴) رسم می گردد . مقادیر عددی متناظر در جدول (۲-۳) ارائه شده است .

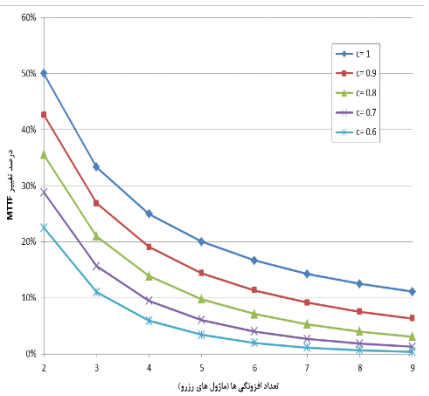


شکل ۲-۴. نمودار MTTF سیستم دارای افزونگی آماده به خدمت ۱ از n

جدول ۲-۳) مقادیر MTTF سیستم دارای افزونگی آماده به خدمت ۱ از n

تعداد افزونه	MTTF				
	C=1	C=0.9	C=0.8	C=0.7	C=0.6
۱	2000	1900	1800	1700	1600
۲	3000	2710	2440	2190	1960
۳	4000	3439	2952	2533	2176
۴	5000	4095.1	3361.6	2773.1	2305
۵	6000	4685.59	3689.28	2941.17	2383.36
۶	7000	5217.03	3951.42	3058.82	2430.02
۷	8000	5695.33	4161.14	3141.17	2458.01
۸	9000	6125.8	4328.91	3198.82	2474.81
۹	10000	6513.22	4463.13	3239.17	2484.88

همینطور نمودار و جدول زیر برای نسبت تغییر :



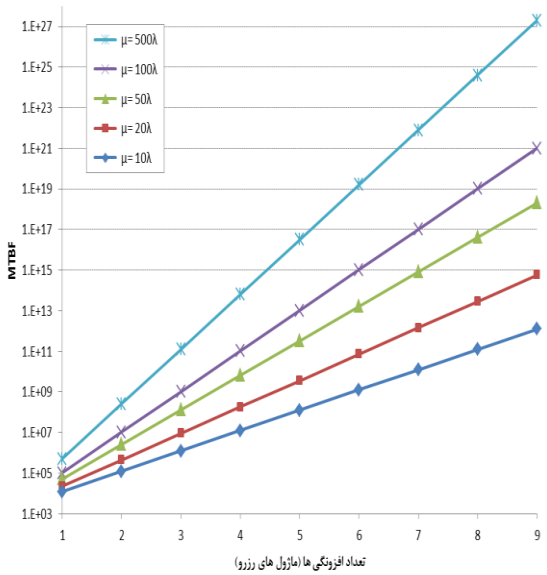
شکل ۲-۵) نمودار نسبت تغییر MTTF سیستم به تعداد افزونگی ها در سیستم های دارای افزونگی

جدول ۲-۴. نسبت تغییر MTTF سیستم به تعداد افزونگی ها در سیستم های دارای افزونگی

تعداد افزونه	درصد افزایش MTTF				
	C=1	C=0.9	C=0.8	C=0.7	C=0.6
۲	50.0%	42.6%	35.6%	28.8%	22.5%
۳	33.3%	26.9%	21.0%	15.7%	11.0%
۴	25.0%	19.1%	13.9%	9.5%	5.9%
۵	20.0%	14.4%	9.7%	6.1%	3.4%
۶	16.7%	11.3%	7.1%	4.0%	2.0%
۷	14.3%	9.2%	5.3%	2.7%	1.2%
۸	12.5%	7.6%	4.0%	1.8%	0.7%
۹	11.1%	6.3%	3.1%	1.3%	0.4%

سیستم های قابل تعمیر

برای نمایش تاثیر تعداد عناصر افزونه و نسبت نرخ های خرابی و تعمیر قطعات در MTBF کلی سیستم ، نمودار MTBF، براساس تعداد متفاوت ماژول های افزونه و در حالتهای مختلف نرخ تعمیر ، با فرض $\lambda = 0.001$، مطابق شکل (۲-۶) رسم می گردد. مقادیر عددی متناظر در جدول (۲-۵) ارائه شده است .



شکل ۲-۶. نمودار MTBF سیستم دارای افزونگی آماده به خدمت ۱ از n

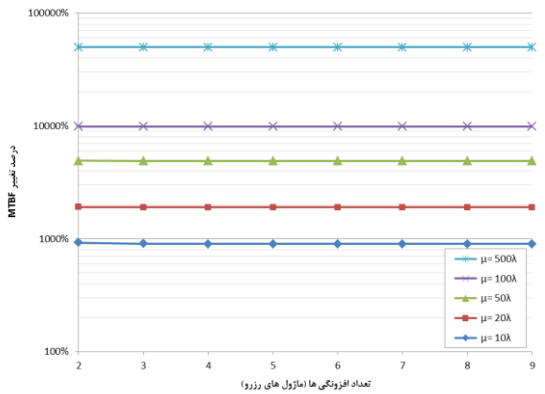
جدول ۲-۵. مقادیر MTBF سیستم دارای افزونگی آماده به خدمت ۱ از n

(قابل تعمیر، سوئیچ ایده آل، با فرض نرخ خرابی ثابت 0.001 و یک گروه تعمیرکار)

تعداد افزونه	MTBF				
	μ=10λ	μ=20λ	μ=50λ	μ=100λ	μ=500λ
۱	12000	22000	52000	102000	502000
۲	123000	443000	2.60E+06	1.02E+07	2.51E+08
۳	1.23E+06	8.86E+06	1.30E+08	1.02E+09	1.26E+11
۴	1.23E+07	1.77E+08	6.51E+09	1.02E+11	6.28E+13
۵	1.23E+08	3.55E+09	3.25E+11	1.02E+13	3.14E+16
۶	1.23E+09	7.09E+10	1.63E+13	1.02E+15	1.57E+19
۷	1.23E+10	1.42E+12	8.13E+14	1.02E+17	7.84E+21
۸	1.23E+11	2.84E+13	4.07E+16	1.02E+19	3.92E+24
۹	1.23E+12	5.67E+14	2.03E+18	1.02E+21	1.96E+27

مطابق شکل (۲-۶) ، افزایش تعداد افزونه ها در سیستم های قابل تعمیر منجر به افزایش قابل توجه MTBF می شود . افزایش نرخ تعمیر نسبت به نرخ خرابی نیز ، باعث ارتقای MTBF می گردد ، یعنی در سیستم هایی که دارای تعمیرات کارآمدتری باشند ، کوتاه شدن زمان تعمیر زیرسیستم ها (افزایش نرخ تعمیر) باعث افزایش زمان عملکرد سیستم خواهد شد .

با مقایسه شکل های (۲-۶) و (۲-۴) مشخص می شود که سیستم های قابل تعمیر دارای زمان عملکرد بسیار بالاتری نسبت به سیستم های غیرقابل تعمیر (حتی با داشتن افزونگی های بیشتر) می باشند ، به عنوان مثال ، زمان عملکرد مورد انتظار یک سیستم قابل تعمیر با یک افزونه ، بیشتر از زمان عملکرد مورد انتظار یک سیستم غیرقابل تعمیر با ۹ افزونه بوده و هرچه نرخ تعمیرات زیرسیستم ها نسبت به نرخ خرابی آنها بزرگتر باشد ، این اختلاف بیشتر می شود . در شکل (۲-۷) ، نمودار نسبت تغییرات MTBF با افزایش تعداد ماژول های افزونه و در نسبت های مختلف نرخ تعمیر ، نشان داده شده است . مشخص است که با افزایش ماژول های افزونه ، درصد افزایش MTBF تقریباً ثابت می ماند . (مقادیر عددی متناظر در جدول (۲-۶) آورده شده است) . این نمودار کارآمدی استفاده از افزونه و همچنین لحاظ کردن نسبت های بالاتر نرخ تعمیر نسبت به نرخ خرابی در سیستم را در افزایش زمان انتظاری عملکرد سیستم ، نشان می دهد .



شکل ۲-۷) نمودار نسبت تغییر MTBF سیستم به تعداد افزونگی ها در سیستم های دارای افزونگی

جدول ۲-۶) نسبت تغییر MTBF سیستم به تعداد افزونگی ها در سیستم های دارای افزونگی

تعداد افزونه ها	درصد افزایش MTBF				
	μ=10λ	μ=20λ	μ=50λ	μ=100λ	μ=500λ
۲	925%	1914%	4906%	9903%	49901%

۳	903%	1901%	4900%	9900%	49900%
۴	900%	1900%	4900%	9900%	49900%
۵	900%	1900%	4900%	9900%	49900%
۶	900%	1900%	4900%	9900%	49900%
۷	900%	1900%	4900%	9900%	49900%
۸	900%	1900%	4900%	9900%	49900%
۹	900%	1900%	4900%	9900%	49900%

نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل مارکوف ، فرمول عمومی محاسبه قابلیت اطمینانMTTF سیستم های دارای افزونگی ۱ از n ، از دو روش حل معادلات دیفرانسیل (حل دستگاه معادلات حالت ها، استخراج تابع قابلیت اطمینان و محاسبه MTTF با استفاده از آن) و روش میانبر (محاسبه مستقیم MTTF بدون نیاز به بدست آوردن تابع قابلیت اطمینان با استفاده از ماتریس های گذار در مدل مارکوف) بدست آمده و امکان برآورد این پارامترها برای هر تعداد n دلخواه ، تسهیل گردیده است ، که جهت جلوگیری از حجم مقاله بخش های مهم آن آورده شده است [۱۲] .

به صورت خلاصه، در این پژوهش :

- تابع جمله عمومی MTTF/MTBF برای سیستم هایی با افزونگی ۱ از n بدست آمد .
- روشی جهت تسهیل محاسبه MTTF با استفاده از ماتریس های گذار مارکوفارائه شده و در مقایسه با روش کلاسیک صحه گذاری گردید .
- مفاهیم و تعاریف متعددی از منابع مختلف درخصوص پارامترهای قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی ارائه شده و با هم مقایسه گردیدند .
- روش های متداول ارزیابی قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی بیان شده و نقاط قوت و ضعف آنها ارائه گردید ، همچنین کارآمدی روش مارکوف در ارزیابی قابلیت اطمینان ، نشان داده شد .
- تاثیر افزایش تعداد افزونگی ها بر ارتقای قابلیت اطمینان MTTF در سیستم های مورد مطالعه ، تحلیل شد .

در نهایت می توان به سوال اصلی این پژوهش بدین گونه پاسخ داد که باوجود اینکه استفاده از عناصر افزونه در سیستمها، راهکار موثری در ارتقای قابلیت اطمینان آنها می باشد ، *اما افزایش تعداد افزونه ها لزوماً منجر به افزایش قابلیت اطمینان سیستم ها نشده و گاها موجب کاهش آن نیز می گردد* . باتوجه به اینکه استفاده از افزونگی با محدودیت هایی از قبیل افزایش حجم ، وزن ، هزینه ، پیچیدگی و ... سیستم ها همراه است ، باید همزمان با استفاده از افزونگی ، لحاظ کردن مواردی از جمله استراتژی های تعمیر و نگهداری ، استفاده از سیستم های کنترلی با قابلیت اطمینان بالا و همچنین نوع افزونگی مورد استفاده در کنار این محدودیت ها به منظور بهینه کردن طراحی سیستم ، مد نظر قرار گیرند .

پیشنهادات کاربردی حاصل تحقیق

براساس مطالعه انجام شده و نتایج بدست آمده در این پژوهش پیشنهاد می گردد :

- در سیستم های دارای افزونگی غیر قابل تعمیر ، به منظور ارتقای قابلیت اطمینان سیستم ، ارتقای قابلیت اطمینان سیستم سوئیچینگ به جای افزایش تعداد افزونه ها ، مد نظر قرار گیرد .
- در سیستم های دارای افزونگی قابل تعمیر ، به منظور ارتقای قابلیت اطمینان سیستم ، ضمن توجه به افزایش افزونگی ها (با توجه به محدودیت های سیستم) ، افزایش نرخ تعمیر نسبت به نرخ خرابی (استفاده از استراتژی های مناسب تعمیراتی) نیز مد نظر قرار گیرد .
- در سیستم های دارای افزونگی فعال غیرقابل تعمیر ، درصورت عدم امکان استفاده از سیستم های سوئیچینگ با قابلیت اطمینان بالا ، از افزایش تعداد

افزونه ها به منظور ارتقای قابلیت اطمینان سیستم ، خودداری گردد.

- درصورت امکان ، از سیستم های دارای افزونگی آماده به خدمت قابل تعمیر ، (با توجه به قابلیت اطمینان بسیار بالاتر و تاثیر بیشتر افزایش تعداد افزونه ها در ارتقای قابلیت اطمینان نسبت به سایر سیستم های افزونگی ۱ از n) استفاده گردد .

پیشنهادات مطالعات آتی

در این پژوهش مطابق ادبیات مورد مطالعه ، برای ارزیابی قابلیت اطمینان از فرض های تسهیل کننده ای استفاده گردید که بعضاً در سیستم های واقعی ، قابل کاربرد نمی باشند (هرچند که با داشتن استراتژی های تعمیرات و نگهداری مناسب و یا استفاده از قطعات با قابلیت اطمینان بالا و همچنین طراحی مناسب سیستم می توان به آنها نزدیک شد) ، همچنین توانمندی مدل مارکوف در ارزیابی پارامترهای قابلیت اطمینان در چند سیستم پایه ای دارای افزونگی نشان داده شد . لذا پیشنهاد می گردد در مطالعات آتی با استفاده از مدلهای مارکوف :

- سیستم هایی با پیچیدگی های بیشتر (مانند سیستم هایی با ترکیب های متفاوت افزونگی ، نرخ های خرابی و تعمیر غیرثابت و ...) مورد مطالعه قرار گرفته و برای هر یک نیز به صورت مطالعه موردی یک سیستم کاربردی مورد بررسی قرار گیرد .

- این روش به منظور تعیین جمله عمومی تابع قابلیت اطمینان برای همه ترکیب های افزونگی ، توسعه یابد .

- تحلیل هزینه- فایده در طراحی سیستم های دارای افزونگی انجام گردد .

- روش پژوهش درخصوص سیستم هایی با قابلیت تعمیر کلی مورد مطالعه قرار گرفته و توسعه یابد .

- کاربردهای عملی استفاده از مدل مارکوف در ارزیابی قابلیت اطمینان با انجام مطالعات موردی ، بررسی شده و توسعه یابد .

محدودیت های تحقیق

- کمبود منابع و مطالعات انجام شده در داخل کشور ، در خصوص مدل مارکوف و کاربرد آن در قابلیت اطمینان .
- وجود تعاریف متعدد در خصوص پارامترهای قابلیت اطمینان در منابع مختلف .
- آشنایی اندک افراد فعال در حوزه قابلیت اطمینان با مفاهیم دقیق پارامترهای آن .

منابع و ماخذ

[۱] همتیان بجنوردی سحر ، کفاشی اسماعیل. بررسی معیار قابلیت اطمینان در سیستم های کامپیوتری . در: هشتمین سمپوزیوم پیشرفت علم و فن آوری، (۱۷ بهمن). مشهد: موسسه آموزش عالی خاوران؛ (۱۳۹۲) .

[2]MIL-HDBK-338B: Military handbook Electronic Reliability Design Handbook USA:Department Of Defence. 1998

[۳] قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی توضیح و مقایسه. اداره تحقیقات مخابرات خراسان رضوی؛ (۱۳۹۴).

[4] Milanovic N. Models, Methods and Tools for Availability Assessment of IT-Services and Business Processes [dissertation].BerlinGermany: univ. Berlin; 2010.

[5] Sorin, D. J. Fault Tolerant Computer Architectures, Morgan and Claypool Publisher, Synthesis Lectures on Computer Architectures, Editor: Mark D. Hill. 2009; Vol. 4, No. 9, pp.1-104

[۶] صادقی محمد ، ارائه روشی جدید برای محاسبه MTBF سیستم های کامپیوتری از روی مدل مارکوف آنها [پایان نامه]. دزفول: دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول؛ ۱۳۹۱

[۷] بیرولینی الساندرو. *مهندسی قابلیت اطمینان*. ترجمه جلال راعی، صدف حکیمی زاده. تهران: انتشارات دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری؛ (۱۳۹۴) .

[8]KongniratsaikP,Uncertainty in Reliability Evaluation A Framework and

Practical Case Studies [dissertation]. Duisburg Germany: univ. Duisburg-Essen; 2013.
[9] Wang H, Pham H. Reliability and Optimal Maintenance. London: Springer; 2006.
[10] Boyd M.An Introduction to Markov Modeling concept and uses. NASA Ames Research Center. 2018. Available from: https://ntrs.nasa.gov.

[۱۱] عباس پور اسفدن،قنبر ، *تحقیق در عملیات پیشرفته (برنامه ریزی ریاضی)* ، اساتید برتر ، تهران ۱۳۹۲
[۱۲] ارزیابی قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری سیستم های دارای افزونگی با استفاده از مدل مارکوف ، عباس پور اسفدن ، قنبر – مرادی مجید ، پایان نامه ارشد ، ۱۳۹۶ ، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران جنوب .