

# A Reliability Growth Model for a Launch Vehicle With its Requirements

**Z. Mehrafroz<sup>1\*</sup> and S. Radpour<sup>2</sup>**

1. School of Industrial Eng. Electrical Eng. Dept., Iran Univ. of Science and Tech. (IUST)

2. K. N. Toosi Univ. of Tech.

\*Ave. Farjam, Narmak, Tehran

**mayvan.m.z@yahoo.com**

*In this paper, reliability growth concepts and modeling methods have been studied and a reliability growth model for launch vehicles has been proposed. Numerical example shows how we can obtain the model parameters. A method for calculating the initial launch vehicle reliability is suggested, also a method for estimating and validating of launch vehicle reliability in various number of launches with number of successes based on binomial distribution has been proposed. Results show after 10 successful launches we can conclude that launch vehicle reliability is between 0.741 and 1.*

**Keywords:** reliability growth, launch vehicle, launch vehicle reliability

# ارائه مدل برنامه‌ریزی و رشد قابلیت اطمینان برای یک ماهواره‌بر به همراه ملزومات و روش‌های پیاده‌سازی آن

زهرة مهرافروز<sup>۱\*</sup> و سیاوش رادپور<sup>۲</sup>

۱. دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی صنایع

۲. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پژوهشکده سامانه‌های فضایی، دانشکده مهندسی هوافضا

\* تهران، نارمک، خ فرجام

mayvan.m.z@yahoo.com

در این مقاله به مطالعه مفاهیم رشد قابلیت اطمینان و بررسی روش‌های مدل کردن آن پرداخته شده است و یک مدل رشد قابلیت اطمینان برای ماهواره‌برها پیشنهاد شده است. در مورد نحوه به دست آوردن پارامترهای مدل رشد در قالب یک مثال عددی توضیحاتی آورده شده است. روشی برای محاسبه قابلیت اطمینان اولیه برای ماهواره‌بر آورده شده است و همچنین روشی برای ارزیابی و اعتبارسنجی قابلیت اطمینان ماهواره‌بر در تعداد مختلف پرتاب‌ها با داشتن تعداد موفقیت‌ها ارائه شده که بر اساس توزیع دو جمله‌ای می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بعد از ۱۰ بار پرتاب موفقیت‌آمیز ماهواره‌بر می‌توانیم با سطح اطمینان نتیجه گرفت که قابلیت اطمینان ماهواره‌بر در فاصله (۱ و ۰.۷۴۱) است.

**واژه‌های کلیدی:** رشد قابلیت اطمینان، ماهواره بر، قابلیت اطمینان طراحی، قابلیت اطمینان عملیاتی، قابلیت اطمینان مشاهده شده، اعتبارسنجی صحت قابلیت اطمینان

## مقدمه

سنگینی بر پروژه‌ها و مأموریت‌های مختلف تحمیل نموده‌اند که متناسب با هزینه‌های شکست مأموریت و حساسیت موفقیت آن برای مدیران سطح بالا بوده است. هر قدر که حساسیت و اهمیت یک مأموریت بالاتر باشد، هزینه بالای افزایش قابلیت اطمینان توجیه‌پذیرتر به نظر می‌رسد. به طور مثال تخصیص هزینه بسیار بالا برای پروژه‌های مانند شاتل فضایی که علاوه بر هزینه بالای طراحی، ساخت و عملیات خطرات جانی برای نیروی انسانی در پی دارد در مقابل هزینه قابلیت اطمینان یک موشک ماهواره‌بر آزمایشی که در صورت شکست مأموریت خسارت چندانی ایجاد نمی‌کند قابل توجیه و منطقی به نظر می‌رسد.

برای کاهش هزینه‌های قابلیت اطمینان، یا به عبارت دیگر دستیابی به مأموریت‌های کم هزینه با قابلیت اطمینان بالا، از روش‌هایی برای «رشد قابلیت اطمینان» استفاده می‌شود که در این مقاله با مطالعه تعدادی از روش‌های مدل کردن آن، مدل مناسبی برای مدل‌سازی رشد قابلیت اطمینان در ماهواره‌برها ارائه خواهد

تلاش برای دسترسی به قابلیت اطمینان بالا در پرتاب ماهواره‌برهای کاربردی نظامی و تجاری از اولین شکست‌های پیش آمده در مأموریت‌های فضایی آغاز شد و با بالا رفتن هزینه‌های عملیاتی و در جهت کاهش هزینه‌های شکست مورد توجه بیشتری قرار گرفت. هر چند بروز خطا در مأموریت‌های فضایی با توجه به محیط غیرقابل کنترل و معمولاً ناشناخته آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است؛ اما تلاش مهندسان قابلیت اطمینان نشان داده است که با افزایش زمان و هزینه صرف شده در طراحی، آزمایش و ساخت سامانه‌های فضایی می‌توان از احتمال بروز انواع خطا کم کرد. به همین دلیل ایجاد تعادل بین هزینه‌های افزایش قابلیت اطمینان و هزینه‌های شکست پروژه یکی از مسائل مهم پیش روی مدیران صنایع فضایی است. فرآیندهای متنوعی برای افزایش قابلیت اطمینان سامانه‌های فضایی مورد استفاده قرار گرفته است که بعضاً هزینه‌های بسیار

فرآیند با آزمایش نمونه‌های اولیه محصول یا اجزا با افزایش سطح فشار شروع می‌شود. خرابی‌ها باید روی دهند تا اطلاعات درباره خرابی‌ها، حالت‌های خرابی، زمان تا خرابی و هرگونه اطلاعات مرتبط و مورد نیاز جمع‌آوری شده و توسط مهندسان به منظور کشف علل خرابی مورد تحلیل قرار گیرد. این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا به نتایج رضایت بخشی برسیم. در چنین برنامه‌هایی خیلی مهم است که همه حالت‌های خرابی به‌طور کامل تحلیل شوند و اقدامات اصلاحی در طراحی یا تولید اخذ شود تا اطمینان حاصل شود که آن‌ها دوباره رخ نخواهند داد.

از آنجاکه ارزیابی رشد قابلیت اطمینان در مراحل اولیه سیکل ساخت شروع می‌شود، اغلب به‌ویژه برای محصولات و اجزای جدید اطلاعات کمی موجود است. به‌عنوان یک نتیجه، مدل‌سازی رشد قابلیت اطمینان در بسیاری از وضعیت‌ها ترکیبی از هنر و علم است. در این مقاله نیز سعی شده است که با مطالعه اطلاعات موجود از ماهواره‌برهای گذشته مدلی برای رشد قابلیت اطمینان ماهواره‌بر ارائه شود و نحوه پیاده‌سازی آن در قالب یک مثال عددی آورده شده است.

## مفاهیم متفاوت قابلیت اطمینان

در مقاطع مختلف طول عمر یک محصول، مفاهیم متفاوتی برای قابلیت اطمینان در نظر گرفته می‌شود. سه مقطع عمده مورد نظر در اینجا طراحی، ساخت، آزمایش و عملیات است.

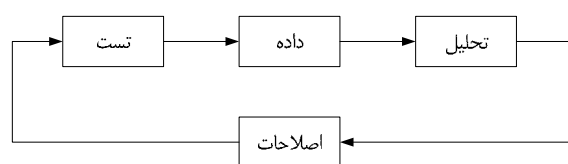
### قابلیت اطمینان طراحی

در فاز طراحی، قابلیت اطمینان در ابتدا به عنوان هدف نهایی سیستم در نظر گرفته شده و به زیرسیستم‌های مختلف تخصیص داده می‌شود. اعداد به‌دست آمده در این مرحله در طراحی و انتخاب سیستم‌ها و اجزای مختلف آنها به‌کار گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال ضرایب ایمنی به‌کار رفته در طراحی قطعات و زیرسیستم‌ها باید با توجه به این اعداد انتخاب و اعمال شوند. در انتهای فاز طراحی، با توجه به محدودیت‌های موجود در طراحی و در تلاش برای رسیدن به هدف قابلیت اطمینان، قابلیت اطمینان طراحی محاسبه می‌شود. این مقدار نشان‌گر این است که اگر همه موارد در طراحی لحاظ شده باشد و در فرآیند ساخت و کاربری سیستم مشکلی وجود نداشته باشد، سامانه تا چه حد قابل اطمینان است. مسلم است که امکان عدم وجود مشکل بسیار کم است و همیشه مشکلاتی بر سر راه وجود خواهد داشت که در فاز طراحی لحاظ نشده‌اند. به همین دلیل تلاش می‌شود در فرآیند طراحی همه عوامل تأثیرگذار در بدبینانه‌ترین حالت و حتی کمی بدتر از بدترین حالت پیش‌بینی شده

شد. در مدت پیاده‌سازی این مدل‌ها، قابلیت اطمینان سامانه‌های فضایی در دست طراحی و ساخت با استفاده از چرخه‌های آزمایش، تحلیل و طراحی مجدد و پرتاب‌های آزمایشی متعدد رشد داده شده و اعتبارسنجی می‌شود. اطلاعات موجود نشان می‌دهد که ماهواره‌برها در پرتاب‌های اولیه عموماً قابلیت اطمینان پایینی داشته‌اند. این‌که این مورد حتی در مورد کشورهای با سابقه و تجربه طراحی و پرتاب بسیار طولانی (اتحاد جماهیر شوروی- روسیه و آمریکا) نیز تا حدودی صادق است نشان‌دهنده این واقعیت است که هر فناوری جدیدی برای رفع اشکالات طراحی، مهندسی و ساخت و رسیدن به قابلیت اطمینان قابل قبول (بالای ۸۰٪) بسته به سابقه قبلی و حجم فناوری جدید به‌کار رفته نیاز به حداقل پنج تا ده آزمون جدی با حضور تمام زیرسیستم‌ها دارد. ممکن است بسیاری از مشکلات طراحی و مهندسی در جریان آزمایش مستقل زیرسیستم‌ها کشف و رفع شود، ولی مشکلات ناشی از کنش بین زیرسیستم‌ها و عملکرد آن‌ها در شرایط طبیعی (که در بسیاری از موارد شبیه‌سازی و مدل‌سازی دقیق آن بسیار دشوار و حتی امکان‌ناپذیر است) تنها در شرایط کامل عملیاتی بروز می‌کنند و کشف و شناسایی آن‌ها نیازمند پرتاب‌های آزمایشی است.

زمان‌بر بودن و تدریجی بودن این روند ایجاب می‌کند که برای افزایش قابلیت اطمینان مأموریت‌های فضایی برنامه‌ریزی بلندمدتی تعریف شود و اهداف قابلیت هر پروژه بر اساس این برنامه تعیین گردد. تعیین اهداف قابلیت اطمینان پروژه‌ها بدون در نظر گرفتن روند کلی رشد و افزایش قابلیت اطمینان امکان‌پذیر نخواهد بود و حتی در صورت امکان هزینه‌های اضافی سنگینی به پروژه‌ها تحمیل می‌کند.

هنگامی که قابلیت اطمینان سیستم با توجه به اجزای آن کم‌تر از مقدار هدف باشد، غیرقابل قبول بوده و می‌بایست بهبود یابد. همان‌طور که اشاره شد، رشد قابلیت اطمینان یکی از رویکردهای اساسی است که برای بهبود قابلیت اطمینان وجود دارد. در رشد قابلیت اطمینان بهبود از طریق یک برنامه آزمایش- تحلیل- و- فیکس<sup>۱</sup> (TAAX) انجام می‌گیرد. شکل (۱) این فرآیند را در حالت تکرار شدن نشان می‌دهد.



شکل ۱- برنامه آزمایش- تحلیل- و فیکس برای رشد قابلیت

سیستم را با صحت قابل قبول تعیین کرد یا دستیابی به قابلیت اطمینان هدف را تأیید نمود.

## رشد قابلیت اطمینان

در طول فازهای اولیه طراحی و ایجاد محصول، نمونه‌های اولیه‌ای که تولید می‌شوند به احتمال زیاد دارای نقص‌های طراحی، تولید و یا مهندسی هستند که مانع از رسیدن به هدف‌ها می‌شوند. به منظور شناسایی و اصلاح نمودن این نقص‌ها معمولاً نمونه‌های اولیه در معرض برنامه‌های سختگیرانه تست قرار داده می‌شوند و اقدامات اصلاحی برای بهبود طراحی انجام می‌شود. این فرایند ساخت یافته کشف مشکلات قابلیت اطمینان و کنترل نمودن افزایش قابلیت اطمینان محصول در طول فازهای متوالی، رشد قابلیت اطمینان نامیده می‌شود.

رشد قابلیت اطمینان از خرابی‌ها و از تحلیل تجهیزات، طراحی، تولید و فرایندهای عملیاتی به دست می‌آید. رشد قابلیت اطمینان به دلیل بهبودهای دائمی در قابلیت اطمینان یک محصول (جزء، زیرسیستم یا سیستم) است که از طریق تغییر در طراحی محصول و یا فرایند تولید نتیجه می‌شود. دوباره‌کاری، تعمیر و اقدامات موقتی رشد قابلیت اطمینان ایجاد نمی‌کند.

مفهوم رشد قابلیت اطمینان مفهومی صرفاً تئوری یا مطلق نیست. رشد قابلیت اطمینان مربوط به فاکتورهایی مانند استراتژی مدیریت به سمت اخذ اقدامات اصلاحی، اثربخشی اقدامات اصلاحی، نیازمندی‌های قابلیت اطمینان، سطح قابلیت اطمینان اولیه، سرمایه‌گذاری قابلیت اطمینان و فاکتورهای رقابتی است. برای مثال، یک تیم مدیریت ممکن است اقدامات اصلاحی برای ۹۰٪ خرابی‌هایی که در طول تست می‌بیند، اتخاذ کند، درحالی‌که تیم مدیریت دیگری با طراحی و اطلاعات تست یکسان اقدامات اصلاحی روی تنها ۶۵٪ خرابی‌ها در نظر بگیرد. در واقع استراتژی‌های مدیریتی متفاوت منجر به دستیابی به مقادیر متفاوتی از قابلیت اطمینان با طراحی اولیه یکسان شد. اثربخشی اقدامات اصلاحی نیز در مقایسه با قابلیت اطمینان اولیه در شروع تست نسبی است. اگر اقدامات اولیه ۴۰٪ بهبود در قابلیت اطمینان سیستمی که ابتدا یک دهم هدف قابلیت اطمینان را دارد، ایجاد کند؛ این بهبود اهمیت ۵۰٪ بهبود در قابلیت اطمینان سیستمی که در ابتدا یک دوم هدف قابلیت اطمینان را دارد، ندارد.

## لزوم مدل رشد قابلیت اطمینان

در ایجاد یک فناوری جدید یا سیستم پیچیده انتظار داریم که اهداف قابلیت اطمینان در ابتدا تعیین شده باشند. رسیدن به

در نظر گرفته شود که سیستم در مقابل تغییرات پیش‌بینی نشده مقاوم<sup>۲</sup> باشد. اما از آنجا که این روش هزینه‌های بسیار بالایی را به طرح تحمیل می‌کند و در شرایطی حتی عملی بودن آن را به خطر می‌اندازد، هیچ‌گاه سیستم طراحی شده کاملاً مقاوم نخواهد بود.

## قابلیت اطمینان عملیاتی

در فاز طراحی و ساخت سیستم، زیرسیستم‌های مختلف در عمل ساخته شده و قابلیت اطمینان آنها مورد آزمون قرار می‌گیرد و با محاسبه قابلیت اطمینان عملیاتی زیرسیستم‌ها قابلیت اطمینان عملیاتی سیستم تعیین می‌شود. بسیاری از مشکلات طراحی در این فاز روشن شده و اقدامات اصلاحی در طراحی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. به دلیل بروز همین مشکلات و یافتن خطاهای طراحی است که قابلیت اطمینان محاسبه شده در این فاز در ابتدا از قابلیت اطمینان طراحی پایین‌تر است. ولی از آنجا که هدف قابلیت اطمینان در فاز طراحی در پایه کار لحاظ شده است این امکان وجود دارد که با اقدامات اصلاحی و به تدریج قابلیت اطمینان عملیاتی به قابلیت اطمینان طراحی نزدیک شود. این فرآیند در «مدل‌سازی رشد قابلیت اطمینان» مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هرچند همیشه احتمال بروز محدودیت‌هایی بر سر راه فرآیند رشد قابلیت اطمینان وجود دارد و ممکن است هیچ‌گاه قابلیت اطمینان عملیاتی به قابلیت اطمینان طراحی نرسد.

## قابلیت اطمینان مشاهده شده

از آنجا که قابلیت اطمینان عملیاتی با محاسبه قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها محاسبه می‌شود، ممکن است برخی واکنش‌های موجود بین زیرسیستم‌ها را نادیده بگیرد. همچنین به خاطر روشن نبودن مقادیر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها، این مقدار برای ناظران خارجی قابل قبول نیست. قابلیت اطمینان مشاهده شده که مستقیماً از روی نتایج عملیات سیستم محاسبه می‌شود معیاری است که برای ارزیابی و مقایسه قابلیت اطمینان سیستم‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. ممکن است همه زیرسیستم‌ها در آزمون‌های کیفی، قابلیت اطمینان بالایی از خود نمایش داده باشند ولی اگر اجرای یکی از دو عملیات نهایی این سیستم دچار مشکل شود ناظران خارجی قابلیت اطمینانی بیشتر از ۵۰٪ به آن نسبت نخواهند داد. «آزمون‌های ارزیابی و اعتبارسنجی قابلیت اطمینان» که در بخش‌های انتهایی این مقاله در مورد آنها بحث خواهد شد، به این مسئله می‌پردازند که چگونه می‌توان حدود قابلیت اطمینان کل

چندین فاکتور مهم برای یک برنامه کارای رشد قابلیت اطمینان عبارتند از:

**مدیریت:** تصمیمات با توجه به استراتژی مدیریت برای اصلاح کردن یا نکردن مشکلات و اثربخش اقدامات اصلاحی گرفته می‌شوند.

**آزمایش:** ایجاد کردن فرصتهایی برای شناسایی نقاط ضعف حالت خرابی در فرآیند تولید و طراحی.

**شناسایی علت ریشه‌ای حالت خرابی:** سرمایه‌گذاری، پرسنل و رویه‌هایی برای تحلیل، جدا کردن و شناسایی علت خرابی-ها فراهم می‌کند.

**اثربخشی اقدامات اصلاحی:** منابع طراحی برای اجرای اقدامات اصلاحی که اثربخش هستند و از دستیابی به اهداف قابلیت اطمینان حمایت می‌کنند. بخشی از استراتژی مدیریت اثربخش بودن اقدام‌های اصلاحی است. اقدام اصلاحی معمولاً رخداد دوباره یک حالت خرابی را حذف نمی‌کند و به‌طور ساده نرخ رخداد آن را کاهش می‌دهد. یک اقدام اصلاحی برای یک حالت خرابی مقدار معینی از چگالی خرابی را از بین می‌برد اما مقدار معینی در سیستم باقی خواهد ماند. مقدار کسر کاهش یافته خرابی به علت اقدام اصلاحی فاکتور کارایی (EF) نامیده می‌شود که از هر حالت خرابی به دیگری تغییر می‌کند و متوسط معمول صنایع برای آن حدود ۰.۷ گزارش شده است.

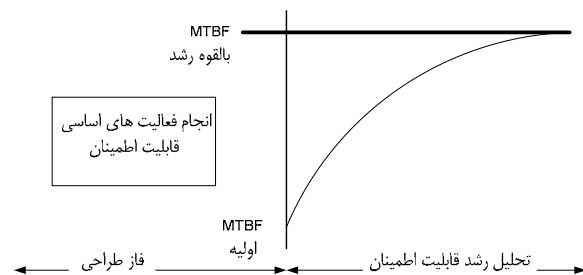
## مدل‌سازی رشد قابلیت اطمینان

رشد قابلیت اطمینان معمولاً به وسیله رسم نمودار هر یک از سه شاخص زیر در طول زمان به‌دست می‌آید:

۱. افزایش در احتمال موفقیت‌آمیز مأموریت
۲. افزایش در MTBF
۳. کاهش در نرخ خرابی به عنوان تابعی از زمان

این نمودارها نمودارهای لگاریتمی هستند که روند بهبود، بدتر شدن یا عدم تغییر در قابلیت اطمینان را نشان می‌دهند. روندهای مشاهده شده در این نمودارها برای پیش‌بینی خرابی‌ها به عنوان تابعی از زمان آزمایش اضافی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمودارهای رشد قابلیت اطمینان علاوه بر این که اجازه می‌دهند که تعیین شود آیا نیازمندی‌های قابلیت اطمینان به‌دست خواهند آمد، هم‌چنین می‌توانند به تعیین زمان موردنیاز برای برآوردن این نیازمندی‌ها و هزینه‌های مربوطه کمک کنند. برآزش یک منحنی بر روی داده‌های موجود نشان می‌دهد که چه قابلیت اطمینانی از یک برنامه می‌توان انتظار داشت که به‌دست آید مشروط بر این که شرایط آزمایش و تلاش مهندسی به منظور بهبود قابلیت اطمینان در سطح کنونی آنها

اهداف قابلیت اطمینان مختلف معمولاً اجرای یک برنامه قابلیت اطمینان و انجام فعالیت‌های قابلیت اطمینان را در برمی‌گیرد. این فعالیت‌ها می‌توانند از برنامه‌ای به برنامه دیگر متفاوت باشند. در میان این فعالیت‌ها، آزمایش رشد قابلیت اطمینان (RDGT) در ارتباط با یافتن و اصلاح نقص‌های قابلیت اطمینان است. شاخص MTBF (این شاخص میانگین زمان بین دو خرابی را نشان می‌دهد) برای نمونه‌های اولیه‌ای که بلافاصله بعد از فعالیت‌های اساسی قابلیت اطمینان (مدل‌سازی، پیش‌گویی، تخصیص قابلیت اطمینان، آنالیز خرابی‌ها و ...) ایجاد می‌شوند MTBF اولیه نامیده می‌شود. در فاز طراحی مقدار MTBF بالقوه رشد مشخص می‌شود و تنها در صورتی می‌توان به این MTBF بالقوه رسید که فعالیت‌های اساسی قابلیت اطمینان از جمله آزمایش رشد قابلیت اطمینان بعد از فاز طراحی ادامه داشته باشند تا بتوان مقدار MTBF اولیه را افزایش داد و به مقدار بالقوه آن رسید.



شکل ۲- استراتژی مدیریت و پتانسیل رشد

به‌طور خلاصه، MTBF اولیه از طریق فعالیت‌های اساسی به‌دست می‌آید و MTBF پتانسیل رشد MTBF ای است که از طریق هدایت کردن آزمایش‌ها به دست آید.

## عناصر یک برنامه رشد قابلیت اطمینان

در یک برنامه رشد قابلیت اطمینان رسمی هدف (یا اهدافی) برای قابلیت اطمینان قرار داده می‌شود و باید در طول ایجاد برنامه آزمایش از طریق تخصیص یا تخصیص دوباره منابع به‌دست آید. بنابراین، برنامه‌ریزی و ارزیابی فاکتورهای ضروری در یک برنامه فرآیند رشد هستند. یک برنامه جامع رشد قابلیت اطمینان نیاز به برنامه‌ریزی ساختاریافته‌ای از روش‌های ارزیابی دارد. مقایسه بین مقادیر برنامه‌ریزی شده و مقادیر ارزیابی شده تخمین خوبی از این که آیا برنامه مطابق زمان‌بندی پیشرفت کرده یا نه، فراهم می‌کند.

### مدل Lloyd Lipow

در این مدل قابلیت اطمینان نهایی برابر ۱ در نظر گرفته شده است و رشد دارای نموداری نمایی است. مدل به صورت زیر است:

$$R_j = 1 - \alpha e^{-\gamma(1-j)}$$

به گونه‌ای که  $\alpha$  و  $\gamma$  به عنوان پارامترهای تابع رشد از داده‌های موجود تخمین زده می‌شوند. در این مدل فرض شده که احتمال اصلاح خرابی در هر بار یکسان است.

### مدل‌های رشد قابلیت اطمینان پیوسته

همان‌طور که اشاره شد، مدل‌های پیوسته تلاش در توصیف بهبود در نرخ خرابی (یا متوسط زمان بین خرابی‌ها) به عنوان تابعی از زمان کلی آزمایش دارند. در ادامه به تعدادی از این مدل‌ها اشاره می‌شود:

#### مدل دان<sup>۴</sup>

در سال ۱۹۹۲ دان گزارشی منتشر کرد که در آن داده‌های خرابی سیستم‌های مختلفی را در طول برنامه‌های ساخت آن‌ها ارائه کرد. هنگام تحلیل داده‌ها مشاهده شد که MTBF تجمعی در مقابل زمان عملیاتی تجمعی هنگام ترسیم روی کاغذ لگاریتمی یک خط مستقیم را نشان می‌دهند. بر مبنای آن مشاهده‌ها، دان مدل خود را به شکل زیر توسعه داد. اگر  $N(T)$  تعداد شکست‌ها در مدت زمان  $t$  باشد، میانگین مشاهده شده زمان بین شکست‌ها، MTBF، در زمان  $T$  برابر است با:

$$MTBF_C = \frac{T}{N(T)}$$

که می‌توان معادله خط مستقیم را تخمین زد.

### مدل Gompertz استاندارد

مدل رشد قابلیت اطمینان Gompertz استاندارد اغلب هنگام تحلیل داده‌های موفقیت/شکست و داده‌های قابلیت اطمینان به دست آمده در توسعه برنامه‌های رشد قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل استاندارد Gompertz هنگامی که داده‌های قابلیت اطمینان از یک شکل مقعر پیروی می‌کنند، بیشترین قابلیت اجرا را دارد. مدل Gompertz استاندارد به طور ریاضیاتی به وسیله معادله سه پارامتری زیر داده شده است:

$$R = a b c^T$$

به طوری که:

نگهداری شود. اگر نمودار رشد قابلیت اطمینان نشان دهد که به هدف قابلیت اطمینان نمی‌رسد یا از آن تجاوز نمی‌کند، در نتیجه طراحی محصول می‌بایست بهبود یابد. این امر می‌تواند به استفاده از اجزاء با قابلیت اطمینان بالاتر یا افزودن نیاز داشته باشد. منابع اضافی نیز باید اختصاص یابد تا طراحی و ساخت محصولی با قابلیت اطمینان بالاتر جهت رسیدن به نرخ تحویل مورد نیاز انجام گیرد. هدف اکثر مدل‌های رشد قابلیت اطمینان آن است که قابلیت اطمینان و دیگر شاخص‌های مورد نظر سیستم در حالت جاری و آینده به دلیل ایجاد تغییر حاصل از اقدام‌های اصلاحی را محاسبه کنند. این مدل‌ها می‌توانند به دو نوع گسسته و پیوسته تقسیم‌بندی شوند. مدل‌های پیوسته در ارتباط با داده‌های پیوسته به کار می‌روند و تلاش در توصیف بهبود در نرخ خرابی (یا متوسط زمان بین خرابی‌ها) به عنوان تابعی از زمان کلی آزمایش دارند. مدل‌های گسسته داده‌های گسسته را در برمی‌گیرند و در ارتباط با بهبودهای نهایی در قابلیت اطمینان به عنوان نتیجه‌ای از تغییرات در طراحی می‌باشند. این بهبودها به عنوان توابعی از احتمال موفقیت در چند بار انجام آزمایش بیان می‌شوند. هر بار آزمایش با انجام موفقیت‌آمیز آزمایش و یا با رخداد یک خرابی پایان می‌پذیرد.

### مدل‌های رشد قابلیت اطمینان گسسته

این مدل‌ها رشد قابلیت اطمینان در مراحل نهایی را در نظر می‌گیرند و قابلیت اطمینان در مرحله  $j$  با  $R_j$  نشان داده می‌شود. فرم کلی این مدل‌ها به صورت  $R_j = R_\infty - \theta g(j)$  است که در رابطه بالا  $R_\infty$  حداکثر قابلیت اطمینان قابل دستیابی است هنگامی که  $\theta \rightarrow \infty$ ،  $j$  پارامتری است که بیان‌کننده نرخ رشد است و تابع  $g$  نیز تابعی غیرمنفی و کاهشی است.

### مدل رشد قابلیت اطمینان Weiss

در این مدل رشد قابلیت اطمینان به عنوان نتیجه اقدام‌های اصلاحی روی خرابی هر قطعه روی می‌دهد. این مدل رشد قابلیت اطمینان را برحسب کاهش در نرخ خرابی حاصل از انجام اقدام‌های اصلاحی بیان می‌کند. همچنین فرض می‌شود که نرخ خرابی  $\lambda_j$  در فاصله بین مرحله  $(j-1)$  تا مرحله  $j$  ثابت است.

$$\lambda_j = \lambda + \frac{\theta}{j}$$

جایی که  $\lambda$  کم‌ترین نرخ خرابی ممکن نهایی و  $\frac{\theta}{j}$  حداکثر

بهبود باقی‌مانده در مرحله  $j$  است.

این ماهواره‌برها می‌توانیم قابلیت اطمینانی را برای ماهواره‌بر در حال طراحی تخمین بزنیم. با داشتن تعداد موفقیت‌ها (s) و تعداد پرتاب‌های یک ماهواره‌بر (n) و استفاده از فرمول  $\frac{s+1}{n+2}$  که با در نظر گرفتن تابع چگالی بتا به دست می‌آید و در تحلیل اطلاعات مربوط به ماهواره‌برهای گذشته نیز از آن استفاده شده است [۴] مقدار اولیه‌ای برای قابلیت اطمینان در فاز طراحی مفهومی به دست می‌آید. به عنوان مثال اگر اطلاعات آماری نشان دهد که ماهواره‌برهای مشابه ماهواره‌بر در حال طراحی در ۵ پرتاب اولیه خود تنها یک شکست داشته است. با توجه به آنچه گفته شد، مقدار قابلیت اطمینان اولیه برای ماهواره‌بر فعلی ۰/۷۱ تخمین زده می‌شود.

### تعیین تعداد پرتاب‌های مورد نیاز برای رسیدن به قابلیت اطمینان مورد نظر (n)

این عدد نیز می‌تواند با بررسی‌های آماری ماهواره‌برهای مشابه به دست آید. همچنین در بخش بعدی روشی برای اعتبارسنجی و صحت قابلیت اطمینان مطرح می‌شود که با استفاده از نمودارهای موجود در آنجا می‌توانیم حدود اطمینان بالا و پایین برای قابلیت اطمینان به ازای هر تعداد پرتاب به دست آوریم. مثال عددی:

فرض کنید که می‌خواهیم مدلی برای رشد قابلیت اطمینان ماهواره‌بری ارائه دهیم که تا حدودی اطلاعات مربوط به ماهواره‌برهای مشابه آن موجود است. ماهواره‌بر مشابه آن در ۵ پرتاب اولیه خود تنها یک شکست داشته و مطابق آنچه در زیر بخش قبلی گفته شد مقدار ۰/۷۱ برای قابلیت اطمینان اولیه آن به دست می‌آید ( $R_1=0.71$ ). همچنین اگر هدف رسیدن به سطح قابلیت اطمینان ۰/۹ باشد، مطالعات آماری نشان می‌دهد برای ماهواره‌بری با ویژگی‌های ماهواره‌بر در حال طراحی لازم است تعداد ۶ پرتاب صورت گیرد تا به قابلیت اطمینان مورد نظر برسیم ( $R_6=6$ ). اطلاعات موجود منجر به مقدار ۰/۲۹ برای  $\alpha$  و مقدار ۰/۲۱ برای پارامتر  $\gamma$  می‌شود.

شکل (۳) مدل رشد قابلیت اطمینان را نشان می‌دهد که با استفاده از اطلاعات فوق و مدل رشد در نظر گرفته شده به دست آمده است. بر اساس مدل فوق، برای دستیابی به قابلیت اطمینان ۰/۹ لازم است با رفع مشکلات احتمالی موجود در طراحی و ساخت، قابلیت اطمینان ماهواره‌بر در طول مدت ۶ پرتاب اولیه ارتقاء داده شود تا هدف قابلیت اطمینان محقق گردد.

$$0 < a < 1$$

$$0 < b < 1$$

$$0 < c < 1$$

T: زمان، شماره پرتاب یا شماره مرحله،  $T > 0$

R: قابلیت اطمینان سیستم در T

a: حد بالایی که رویکردهای قابلیت اطمینان به سمت آن میل می‌کنند به طوری که  $T \rightarrow \infty$ ، یا ماکزیمم قابلیت اطمینانی که بتواند به دست آید.

ab: قابلیت اطمینان اولیه در زمان  $T = 0$ .

c: شاخص الگوی رشد (مقدار کوچک برای c رشد قابلیت اطمینان اولیه سریعی را نشان می‌دهد و مقادیر بزرگ c رشد آهسته قابلیت اطمینان را نشان می‌دهد).

### ارائه مدل رشد قابلیت اطمینان پیشنهادی

باتوجه به عملکرد بیشتر ماهواره‌برها، می‌توان روندی به شکل نمایی منفی برای مدل رشد قابلیت اطمینان در یک ماهواره‌بر تخمین زد. همچنین از آنجا که مقدار قابلیت اطمینان در هر بار پرتاب تخمین زده می‌شود و واضح است که تعداد پرتاب‌ها به شکل گسسته است، مدل رشد قابلیت اطمینان در مورد یک ماهواره‌بر یک مدل رشد گسسته است. مدل رشد پیشنهادی استفاده از مدل Lloyd Lipow است و در ادامه توضیح در مورد این که چگونه می‌توانیم پارامترهای این مدل را به دست آوریم، آورده شده است. همان‌طور که در بخش معرفی انواع مدل‌های رشد اشاره شد، در این مدل قابلیت اطمینان نهایی برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود و رشد دارای نموداری نمایی است. مدل به صورت زیر است:

$$R_j = 1 - \alpha e^{-\gamma(1-j)}$$

تخمین پارامترهای  $\alpha$  و  $\gamma$  نیز با استفاده از دو مقدار  $R_1$ ، مقدار قابلیت اطمینان اولیه و مقدار  $R_n$ ، مقدار قابلیت اطمینان در بار nام می‌تواند محاسبه شود. در ادامه نیز در مورد روش‌های تعیین مقدار  $R_1$ ،  $R_n$  و n توضیحاتی آورده می‌شود.

### تخمین مقدار قابلیت اطمینان اولیه برای ماهواره‌بر

به منظور تخمین یک مقدار اولیه قابلیت اطمینان برای ماهواره‌بر (در فاز طراحی مفهومی)، با مطالعه ماهواره‌برهای قبلی و در دست بودن اطلاعات مربوط به موفقیت و شکست

به سطح قابلیت اطمینان ماهواره‌بر و سطح اطمینان مورد قبول (با توجه به خطای قابل پذیرش برای سیستم) به ارائه حدود اطمینان برای مثال عددی مقاله پرداخته می‌شود.

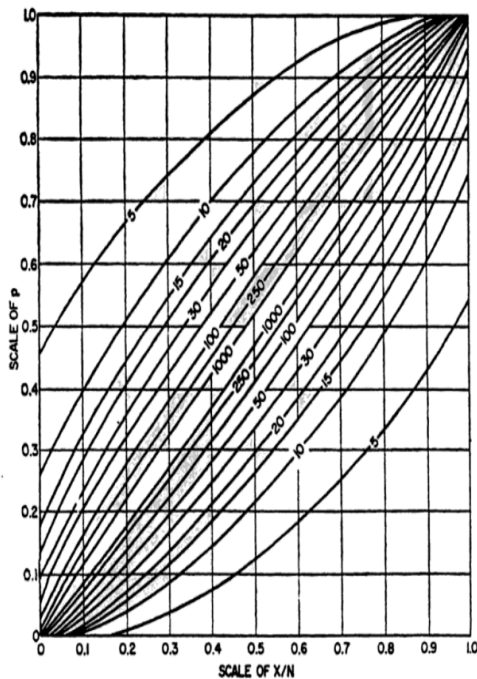
توزیع دو جمله‌ای در ارتباط با انجام n آزمایش مستقل برنولی است که نتایج آن‌ها موفقیت یا شکست است و احتمال موفقیت در هر یک از n آزمایش یکسان است. تعداد موفقیت‌ها در n آزمایش را با s نشان می‌دهیم. برای محاسبه حدود اطمینان برای R نیز می‌توانیم از جدول‌ها یا نمودارهای موجود استفاده کنیم. برای استفاده از این جدول‌ها باید ابتدا مقدار سطح اطمینان مورد نظر را مشخص کرد و بعد مقدار n و s را وارد جدول کرده و حدود اطمینان بالا و پایین قابلیت اطمینان را به دست آورد.

اگر  ${}^yCL$  نشان‌دهنده سطح اطمینان مورد نظر،  $R_{L1}$  و  $R_{L2}$  نیز به ترتیب نشان‌دهنده حدود قابلیت اطمینان بالا و پایین باشند، رابطه‌ای که وجود دارد عبارت است از:

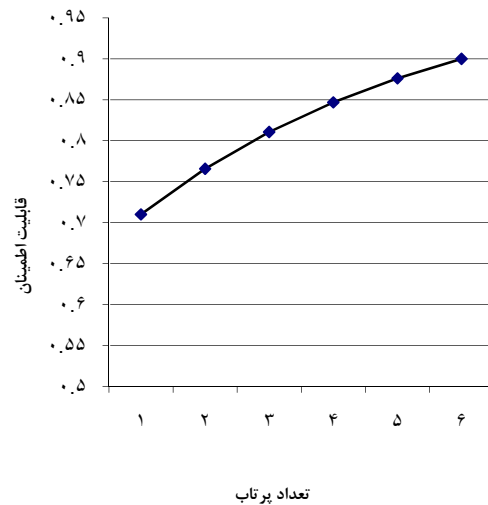
$$p(R_{L2} < R < R_{L1}) = CL$$

برای به دست آوردن حدود اطمینان یک طرفه از رابطه زیر استفاده می‌شود تا سطح اطمینان حالت یک طرفه ( $CL_1$ ) را به سطح اطمینان حالت دوطرفه ( $CL_2$ ) تبدیل کنیم.

$$CL_1 = CL_2 + \frac{1}{2(1 - CL_2)} = \frac{1}{2}(1 + CL_2)$$



شکل ۴- حدود اطمینان دو طرفه دو جمله‌ای برای سطح اطمینان ۰/۹ و اندازه نمونه  $5 < n < 1000$



شکل ۳- مدل رشد قابلیت اطمینان پیشنهادی

## ارزیابی و اعتبارسنجی قابلیت اطمینان

مشاهده<sup>۵</sup> قابلیت اطمینان در سیستم‌های خیلی پیچیده می‌تواند بسیار پرهزینه باشد. اکثر اوقات نمونه‌های اولیه طراحی ساخته و آزمایش می‌شوند تا خرابی مصیبت باری روی دهد. سوالاتی در اینجا مطرح می‌شود مشابه این که آیا هزینه‌های مربوط به آزمایش تأیید قابلیت طراحی در سطح سیستم، توجیه اقتصادی برای سازمان دارد؟ بسیاری از سازمان‌ها حاضر نیستند بیشتر از دو یا سه نمونه را آزمایش کنند، آیا این استراتژی درست است؟ آیا قابلیت اطمینان می‌تواند به وسیله یک سطح اطمینان معین هنگامی که اندازه نمونه خیلی کوچک است، مشاهده شود؟ بدیهی است که مسئله زمانی که هدف طراحی و ساخت سیستمی مانند یک ماهواره‌بر است، از حساسیت بالا و اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. هدف این بخش ارائه روشی جهت تعیین حدود اطمینان برای قابلیت اطمینان ماهواره‌بر است که این حدود بر اساس سطح اطمینان مورد نظر و اندازه نمونه معینی صورت می‌پذیرد.

آزمون‌های فرض زیادی برای صحت‌سنجی اعتبار قابلیت اطمینان ارائه شده‌اند که از توزیع‌های آماری متفاوتی مانند توزیع‌های بتا، مربع کای و دوجمله‌ای استفاده نموده‌اند. با توجه به ماهیت سیستم ماهواره‌بر که سیستمی غیرقابل تعمیر است و نتایج هر بار آزمایش بر روی آن موفقیت یا شکست است، استفاده از توزیع دو جمله‌ای برای ارائه حدود اطمینان مناسب‌ترین روش به نظر می‌رسد. در ادامه درباره این توزیع آماری (دوجمله‌ای) و نحوه ارائه حدود اطمینان آن توضیحاتی آورده شده‌است. هم‌چنین با توجه

5. Demonstration
6. Reification



## نتیجه گیری

در این مقاله مروری بر مفاهیم و مدل‌های رشد قابلیت اطمینان انجام گرفته است. همچنین مدلی برای رشد قابلیت اطمینان ماهواره بر ارائه شد. تخمین‌ها باید بر اساس اطلاعات موجود از سایر ماهواره‌ها که شباهت بیشتری به ماهواره بر در حال طراحی دارند، صورت پذیرد. این تخمین‌ها شامل تخمین مقداری برای قابلیت اطمینان اولیه ماهواره بر و تخمین مدلی برای رشد آن می‌باشد. در این مقاله همچنین آزمونی برای آزمایش اعتبار قابلیت اطمینان ارائه گردیده است. نتایج بیان می‌کنند که تنها پس از ۱۰ بار پرتاب ماهواره بر اطلاعات به اندازه کافی برای صحت‌سنجی اعتبار قابلیت اطمینان با سطح اطمینان ۰/۹۵ وجود خواهد داشت. مدل رشد پیشنهادی نیز نشان می‌دهد تعداد ۶ پرتاب برای دستیابی به قابلیت اطمینان عملیاتی ۰/۹ که در فاز طراحی در نظر گرفته می‌شود، مورد نیاز است.

## مراجع

- [1] Blischke, Wallace R. and Murthy, D. N. Prabhakar. *Reliability- Modeling, Prediction, and Optimization*, Wiley, 2000.
- [2] Wasserman, Gary S., *Reliability Verification, Testing, and Analysis in Engineering Design*, Marcel Dekker, 2003.
- [3] Kececioglu, Dimitri. *Reliability and Life Testing Handbook*, Prentice Hall, 2002.
- [4] Chang, I-Shih. "Space Launch Vehicle Reliability," *Crosslink Spring*, Vol. 6, No.2, 2005.
- [5] Probabilistic Risk Assessment Procedure Guide for NASA Managers and Practitioners, Version 1.1, NASA Headquarters, Washington, DC 20546, 2002.
- [6] Available: [on line], [www.reliasoft.com](http://www.reliasoft.com)
- [7] Available: [on line], [www.barringer1.com](http://www.barringer1.com)
- [8] Available: [on line], [www.reliasoft.com](http://www.reliasoft.com)

بعد از ۱۰ بار پرتاب موفقیت‌آمیز ماهواره بر می‌توانیم با سطح اطمینان ۰/۹۵ نتیجه گرفت که قابلیت اطمینان ماهواره بر در فاصله (۱ و ۰/۷۴۱) است. این نتایج از شکل (۴) که برای سطح اطمینان دو طرفه ۰/۹ یا سطح اطمینان یک طرفه ۰/۹۵ طراحی شده است، به دست آمده است. نمودارهای این بخش بر مبنای توزیع دو جمله‌ای و حدود اطمینان برای آن به دست آمده‌اند.

با توجه به گسترده بودن محدوده محاسبه شده برای قابلیت اطمینان (۱ و ۰/۷۴) و بالا بودن تعداد پرتاب موفق متوالی مورد نیاز (۱۰ پرتاب موفق متوالی) به نظر نمی‌رسد که دستیابی به قابلیت اطمینان ۰/۹ برای ماهواره بر تحقیقاتی امری قابل دستیابی یا حداقل قابل اثبات باشد. بر اساس اطلاعات موجود، قابلیت اطمینان ماهواره‌برهای جدید و بدون پرتاب آزمایشی در ناسا به دلیل در دست نبودن اطلاعات دقیق مورد نیاز کمتر از ۰/۳ (با درصد احتمال بروز خطای بالاتر از ۷۰٪) در نظر گرفته می‌شود و پس از جمع‌آوری اطلاعات دو پرتاب اولیه، نسبت به محاسبه قابلیت اطمینان و محاسبه مدل رشد آن اقدام می‌گردد [۵]. در هر صورت تخصیص قابلیت اطمینان ۰/۹ برای ماهواره‌برهایی کاربردی خواهد بود که تعداد پرتابی (پس از حداقل دو پرتاب اولیه آزمایشی) بالای ۳۰ داشته باشند تا با درصد خطای ۵٪ بتوان قابلیت اطمینان آن‌ها را بالای ۰/۹ ارزیابی نمود. هرچند قابلیت اطمینان تخصیص شده هر مقدار که باشد در فرآیند تخصیص قابلیت اطمینان و طراحی اجزای ماهواره بر تاثیرگذار است. با توجه به مسائل فوق، در محاسبه‌های قابلیت اطمینان و مدل‌سازی رشد آن قابلیت اطمینان هدف همچنان ۰/۹ در نظر گرفته شده است تا این محاسبه‌ها در مراحل بعد از پرتاب‌های آزمایشی (حداقل ۲ پرتاب) مورد استفاده قرار گیرد.