



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 5, No. 2, pp.: 144-155
2026

DOI:
[10.22034/jsssta.2026.513896.1238](https://doi.org/10.22034/jsssta.2026.513896.1238)

Article Info

Received: 2025-03-25
Accepted: 2025-08-08

Keywords

Stirling Cooler, Life Test,
small sample, Nelson-Allen
Method, Crew method,
Caplan -Mier method

How to Cite this article

M. A. Farsi, "Evaluating the
lifespan of a Stirling cooler
system, considering different
failure modes", *Journal of
Space Science, Technology &
Applications*, Vol. 5, No. 2,
pp. 144-155, 2026.

Evaluating the lifespan of a Stirling cooler system, considering different failure modes

Mohammad Ali Farsi^{1*}

¹ *Asso. Prof., Aerospace Research Institute, Ministry of science research and technology,
Tehran, Iran
Farsi@ari.ac.ir

Abstract

The expected lifespan is a primary concern for engineers involved in the design and construction of equipment. Accurately calculating the lifespan of complex systems necessitates the use of specific techniques and methodologies. This paper presents an experimental investigation of a Stirling cooler, as a heat engine that generates cryogenic temperatures through the cyclic compression and expansion of helium gas at different temperature levels. The data obtained from lifespan testing have been thoroughly analyzed. Four samples of this cooler were utilized for the test, and control parameters, including temperature and current intensity, were closely monitored. A system failure or an increase in its parameters beyond specified levels is considered as a failure event. This study explores the differentiation of failure modes and their impact on reliability calculations, as well as recommendations for inspection and maintenance intervals. Due to the limited number of samples, various nonparametric methods, including Nelson-Allen, Kaplan-Meier and Crow, were employed to analyze and estimate the parameters. The research findings indicate that the results obtained from the Kaplan-Meier method are less accurate compared to the other two methods. Furthermore, for these systems, isolating failure modes facilitates the reliability calculation process and reduces maintenance costs.

ارزیابی طول عمر سیستم کولر استرلینگ با در نظر گرفتن حالت های مختلف خرابی

محمد علی فارسی*

۱- پژوهشگاه هوافضا- وزارت علوم تحقیقات و فناوری- Farsi@ari.ac.ir

نویسنده مسئول *

دسترسی پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دوفصلنامه علوم، فناوری و

کاربردهای فضایی

سال پنجم، شماره ۲، صفحه ۱۵۵-۱۴۴

پاییز و زمستان ۱۴۰۴

DOI:

10.22034/jssa.2026.513896.1238

چکیده

طول عمر مورد انتظار، همواره یکی از دغدغه‌های مهندسين در طراحی و ساخت تجهیزات است. محاسبه عمر در سیستم‌های پیچیده نیازمند تکنیک‌ها و روش‌های خاص است. در پژوهش حاضر، کولر استرلینگ به عنوان یک موتور حرارتی که با فشرده‌سازی و انبساط چرخه‌ای گاز هلیوم در سطوح مختلف دمایی باعث تولید دمای فوق سرد (کرایوژنیک) شده است و به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل از آزمون عمر آن تحلیل شده است. برای انجام آزمون، چهار نمونه از این کولر استفاده شده است و پارامترهای کنترلی آن شامل: دما و شدت جریان پایش می‌شود. در صورت از کار افتادن سیستم و یا افزایش پارامترهای آن به بیش از میزان تعیین شده، این وضعیت به عنوان خرابی لحاظ شده است. در این مطالعه، موضوع تفکیک حالات خرابی و اثر آن بر روی محاسبه قابلیت اطمینان و توصیه زمان بازرسی و نگهداری بررسی شده است. با توجه به تعداد اندک نمونه‌ها، روش‌های مختلف ناپارامتریک نظیر: نلسون-آلن، کاپلان-مایر و کرو، برای تحلیل و برآورد پارامترها استفاده شده است. اطلاعات حاصل از این تحقیق نشان داد که نتایج روش کاپلان-مایر نسبت به دو روش دیگر دقت کمتری دارد و برای این سیستم‌ها، جداسازی حالات خرابی سبب سهولت در فرآیند محاسبه قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷

واژه‌های کلیدی

کولر استرلینگ، تست عمر، تعداد نمونه اندک، روش نلسون-آلن، روش کرو، روش کاپلان

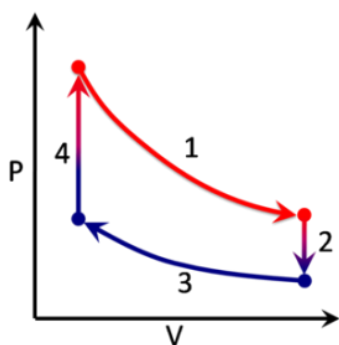
نحوه استناد به این مقاله

محمد علی فارسی، "ارزیابی طول عمر سیستم کولر استرلینگ با در نظر گرفتن حالت های مختلف خرابی"، دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد پنجم، شماره دوم، صفحات ۱۵۵-۱۴۴، ۱۴۰۴.

۱- مقدمه

بازیابی هم حجم، تراکم همدم و بازیابی هم حجم. این چهار فرآیند ترمودینامیک هستند که رخ می‌دهند (شکل ۱).

در انواع مختلف موتور استرلینگ بانام‌های آلفا، بتا، گاما و سنبه آزاد، اصول ترمودینامیکی یکسان است و تفاوت اساسی آنها از نظر نحوه قرار گرفتن اجزای مختلف موتور در کنار یکدیگر هستند [۲-۳]. یکی از مهمترین کاربردهای موتور استرلینگ استفاده از آن برای دفع گرما از محل تولید گرما است. با توجه به راندمان بالای آن، یک گزینه ایده‌آل برای خنک‌کاری قطعات الکترونیکی و الکترواپتیکی است. شکل (۲) نمونه‌ای از این نوع تجهیز را که در صنایع خاص کاربرد دارد نشان می‌دهد. در این مقاله هرگاه از واژه موتور استرلینگ نامبرده شده، منظور موتوری است که برای کاهش دما استفاده می‌شود در حقیقت کاربری آن به صورت کولر است.



شکل (۱): چرخه کاری براساس فشار-حجم

فرایند انتقال حرارت و کاهش دما یک فرآیند سخت و حساس است. لذا در طراحی و استفاده از این موتور به عنوان کولر باید بسیار دقت کرد. به عنوان مثال، اغلب این نوع موتورها برای تولید دمای فوق سرد (حدود ۱۰۰ درجه کلوین) استفاده می‌شوند و با توجه به حوزه کاربردی خاص، مشکلات متعددی در فرایند توسعه و بهره‌برداری آنها رخ می‌دهد [۵-۶]. بنابراین با بهبود و افزایش عملکرد آن می‌توان گام‌های مطمئنی را در جهت بهبود بازدهی برداشت. با توجه به ابعاد کوچک و راندمان بالای این سیستم، یکی از ابزارهای مورد استفاده در صنایع پیشرفته به‌ویژه هوافضا است [۷]. برخی از کاربردهای آن عبارتند از: رادیاتورهای فضایی [۸]، خنک‌کاری بردهای الکترونیکی کوچک و تبادل حرارت در راکتورهای هسته‌ای [۹].

با توسعه جوامع بشری و پیشرفت صنعت، تجهیزات مختلفی تولید شده است تا به نیازهای بشری کمک نمایند. امروزه اغلب این تجهیزات به صورت سیستم‌های مکانیکی-الکترونیکی و نرم‌افزاری هستند و موفقیت در عملکرد آنها، منوط به فعالیت همزمان این بخش‌ها است. هرگونه نقص در هریک از زیر بخش‌ها منجر به شکست مجموعه اصلی خواهد شد. با توجه به افزایش پیچیدگی محصول و با توجه به تعامل بخش‌های مختلف، طراحی آنها مشکل‌تر شده است و در صورت بی دقتی، میزان خرابی و اشکالات ایجاد شده در حین عملکرد به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. با توجه به هزینه نسبتاً بالای تجهیزات جدید و احتمال خرابی آنها، استفاده از تکنیک‌های علمی در تجزیه و تحلیل عملکرد آنها ضروری است. یکی از مجموعه‌های مهم در صنعت تجهیزاتی هستند که از یک موتور الکتریکی برای ایجاد حرکت و تولید توان لازم برای انجام یک فعالیت مکانیکی یا ترمودینامیکی بهره می‌گیرند. کولر استرلینگ نمونه‌ای از این تجهیزات پیچیده است که از یک موتور الکتریکی براساس همراه با مکانیزم مکانیک فشرده‌سازی گاز هلیوم برای تولید دمای فوق سرد - کرایونیک (تقریباً منهای ۱۷۰ درجه سانتیگراد) استفاده می‌کند. موتور استرلینگ یک موتور حرارتی است که در سال ۱۸۱۶ توسط دکتر رابرت استرلینگ اختراع شد. موتور استرلینگ بازدهی بیشتری نسبت به موتورهای بنزینی و دیزلی دارد [۱]. در موتورهای استرلینگ از چرخه استرلینگ استفاده می‌کنند و گاز استفاده شده در داخل موتور هیچ وقت موتور را ترک نمی‌کند به همین علت موتورهای استرلینگ بسیار بی صدا هستند و تولید آلاینده‌گی نمی‌کنند. موتور استرلینگ با استفاده از تبادل حرارت میان دو منبع گرم و سرد، می‌تواند کار مکانیکی یا برقی تولید کند حرارت در دمای گرم به موتور وارد شده، بخشی از آن به کار مکانیکی یا برقی تبدیل شده و مابقی آن در دمای خنک‌تر از موتور خارج می‌شود [۲]. مهمترین چالش این سیستم برای استفاده گسترده و عمومی، پیچیدگی طراحی، هزینه بالای ساخت و تعمیر و نگهداری آن است.

در این موتورها بازده تقریباً نزدیک ماکزیمم بازدهی ممکن که توسط تئوری پیشبینی می‌شود (بازده چرخه کارنو) است. چرخه استرلینگ همانند دیگر چرخه‌های حرارتی دارای چهار فرایند اصلی است. با این حال، این فرایندها به صورت جداگانه اتفاق نمی‌افتد، اما گذار از این حالات با هم همپوشانی دارند. چرخه ایده‌آل استرلینگ از چهار فرایند تشکیل شده است: انبساط همدم،

مشخص می شوند. یکی از بخش های کولرهای استرلینگ مبدل برق^۵ و بردهای الکتریکی آن است. مبدل های برق به کار رفته در کولر استرلینگ قطعه متحرک ندارند و فقط مبدل جریان متناوب به جریان مستقیم است و بردهای الکترونیکی نیز نقش کنترلر موتور را برعهده دارند. بنابراین خرابی بخش الکتریکی شامل خرابی قطعات موتور و اجزای الکترونیکی برد کنترل و سنسورها است.

در چرخه عمر این کولر، که انتظار می رود چندین هزار ساعت کارکرد پیوسته باشد (برخی مدل های ساخته شده توسط ناسا بیش از یکصد هزار ساعت کار می کنند [۱۱])، خرابی های مختلفی می تواند رخ دهد که طراحان سعی می کنند در فرآیند طراحی و ساخت با استفاده از روش های مختلف نظیر: تحلیل درخت خرابی، تحلیل حالات خرابی و اثرات آنها و... احتمال وقوع خرابی را کاهش دهند. ولیکن تحلیل داده های حاصل از عملکرد واقعی یا آزمایش عمر این کولرها ابزاری مناسب برای تحلیل عمر و صحنه گذاری طراحی هستند.

مطالعات انجام شده به صورت اختصاصی بر روی قابلیت اطمینان کولر استرلینگ بسیار اندک است (براساس جستجوی نویسنده در سایت های در دسترس نظیر اسکوپوس و اشپرینگر و غیره).

در محدود مطالعات منتشر شده، چون تعداد نمونه های موجود در آنها بیش از بیست نمونه بوده اند و این اطلاعات در طی چندین سال تست به دست آمده است [۳]، برای ارزیابی قابلیت اطمینان کولر استرلینگ، از روش پارامتریک مبتنی بر توزیع وایبل استفاده شده است [۳، ۶]. شرکتی نظیر شرکت ریکور در چهل سال اخیر بیش از سی هزار نمونه از این تجهیز را ساخته است و میزان اطلاعات در اختیار آنها از حجم و دقت مناسبی برخوردار است. با توجه به یکسان نبودن کیفیت نمونه های خارجی و نمونه داخلی، استفاده از مقادیر مربوط به عمر اعلامی توسط سازنده خارجی، برای نمونه داخلی منطقی نیست و بایستی براساس شرایط موجود مطالعه و بررسی لازم انجام شود. لذا در این تحقیق، با توجه به ساخت داخل بودن و تعداد کم نمونه ها، یک استند طراحی و ساخته شد که بتوان در شرایط آزمایشگاهی عمر مفید را اندازه گرفت. همچنین بخاطر کم بودن تعداد نمونه ها در تحلیل از روش ناپارامتریک استفاده شد.



شکل (۲): موتور استرلینگ (محصول صنعتی) [۴]

این موتور با توجه به کاربری ویژه، از نظر الکترونیکی و الکتریکی از موتورهای بدون جاروبک و مدار کنترلی ویژه استفاده می کند. قطعات متحرک آن نیز با توجه به ابعاد مینیاتوری، با استفاده از روش های خاص و بسیار دقیق ساخته شده و بر روی هم مونتاژ می شوند. به طور کلی این نوع تجهیز به دو بخش عمده الکتریکی و مکانیکی قابل تقسیم است. کارکرد صحیح این کولر نیازمند اطمینان از کارکرد درست هر دو بخش است. شکل ۳ حالات مختلف خرابی ایجاد شده در آن را نشان می دهد.

با بررسی نحوه کارکرد سیستم و سابقه خرابی های موجود در بخش مکانیکی سیستم های کولر استرلینگ، چهار حالت خرابی که بر عمر کولر تأثیر می گذارد، که عبارتند از: سایش^۱، آلودگی گازی^۲، نشت گاز هلیوم^۳ و خستگی^۴. کولر مورد بررسی دارای قیمتی حدود ۲۰۰۰۰ دلار بوده و وزن کل آن کمتر از ۳۵۰ گرم است که بیانگر مینیاتوری بودن اجزاء و لزوم دقت بسیار زیاد در ساخت و مونتاژ است. به عنوان مثال لقی بخش سیلندر پیستون آن در حدود ۴ میکرون و صافی سطح آنها کمتر از ۰/۰۵ میکرون است. سرعت چرخش موتور و حرکت نوسانی پیستون در شرایط عادی کارکرد ۱۵۰۰ دور بر دقیقه است. به صورتی که در هزار ساعت کارکرد بالغ بر ۹۰ میلیون مرتبه، پیستون درون سیلندر حرکت می کند. با توجه به لقی بسیار ناچیز و لزوم آب بندی گاز هلیوم درون آن، سایش در حدود ۲ میکرون، سبب از بین رفتن آب بندی و کاهش راندمان خنک کاری می شود. لازم به ذکر است که این کولر اجزای مکانیکی دیگری نظیر بیرینگ ها دارد که با توجه به وارداتی بودن و گرید خاص آنها، براساس سابقه موجود، در بازه مورد بررسی (۱۵۰۰ ساعت کارکرد)، تاکنون خرابی آنها گزارش نشده و لذا در این تحقیق از بررسی آنها صرف نظر شده است [۱۰]. در بخش الکتریکی نیز خرابی های رخ داده براساس اجزای آن

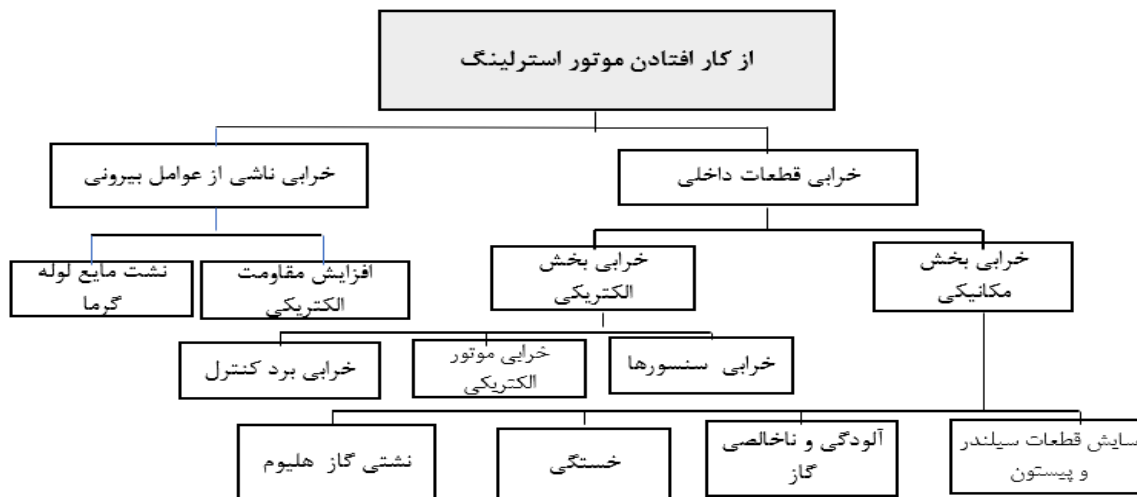
^۴ Fatigue

^۵ Electrical converter

^۱ Wear

^۲ Gaseous contamination

^۳ Helium leakage



شکل (۳): درخت واره خرابی کولر/موتور استرلینگ

اگر از کارافتادن سیستم به صورت تدریجی و به صورت کاهش راندمان و عملکرد باشد استفاده از مدل‌های تصادفی نظیر پدیده وینر یا گاما توصیه شده است. امروزه با توسعه هوش مصنوعی و تکنیک‌های مرتبط با آن از روش‌های مانند شبکه‌های کانولوشنی می‌توان برای پیش‌بینی رفتار یک تجهیز و تقریب زمان خرابی به‌ویژه برای مواردی که با داده انبوه سروکار داریم، استفاده کرد. در این مقاله روش کلاسیک بهره‌گیری از روابط آماری برای تشریح رفتار سیستم استفاده می‌شود. در محاسبه و ارزیابی قابلیت اطمینان، از مفاهیمی نظیر: نرخ خرابی، میانگین عمر برای بیان احتمال از کارافتادگی و خرابی استفاده می‌شود که در ادامه تشریح می‌شوند.

احتمال خرابی یک قطعه در زمان t وابسته به تابع چگالی احتمال خرابی $(f(\theta))$ بوده و به صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$Pr(T \leq t) = \int_0^t f(\theta) d\theta = F(t), \quad t \geq 0 \quad (1)$$

بنابراین تابع قابلیت اطمینان یا احتمال بقای یک قطعه $(R(t))$ برابر است با:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau \quad (2)$$

همچنین رابطه قابلیت اطمینان براساس تابع خطر یا خرابی $(\lambda(\tau))$ به صورت زیر بیان کرد:

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right] \quad (3)$$

در برخی از مواقع تعداد و حجم آزمون‌های انجام شده اندکم بوده است و داده‌های به دست آمده کم است. برای مدلسازی این مسائل که حجم آزمون‌ها و تعداد داده‌های ثبت شده در آنها کم است نمی‌توان از روش‌های پارامتریک و توزیع‌های آماری رایج بهره

مطالعات مختلفی برای مقایسه توانمندی روش‌های ناپارامتریک در حوزه قابلیت اطمینان و موضوعات مرتبط با آن ارائه شده است [۱۲-۱۴]، ولیکن در رابطه با کولر استرلینگ، این روش‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در بخش آتی موضوع قابلیت اطمینان با روش‌های مختلف تحلیل شده، تا مناسب‌ترین روش برای بررسی قابلیت اطمینان و میانگین عمر پیشنهاد شود. لذا مهمترین برجستگی تحقیق انجام شده عبارتند از:

- ۱- تحلیل قابلیت اطمینان یک سیستم الکترونیکی-مکانیکی
- ۲- بررسی حالت‌های خرابی مختلف
- ۳- مقایسه روش‌های ناپارامتریک در تحلیل قابلیت اطمینان برای تعداد نمونه کم انجام تست عملکردی و پایش وضعیت سیستم (تست تجربی).

۲- قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان به مفهوم اطمینان از عملکرد یک تجهیز در شرایط عملکردی ویژه و برای مدت زمان مشخص، در چند دهه اخیر در صنایع پیشرفته و حساس مورد توجه بوده است. در تحلیل‌های مهندسی قابلیت اطمینان به طور معمول از دو روش بهره می‌گیرند:

۱. روش‌های مدلسازی و نرم‌افزاری در تشخیص خرابی و عیب‌یابی [۱۵-۱۶].
۲. تکنیک‌های آماری، در این روش اطلاعات ناشی از زمان خرابی و از کار افتادن مورد توجه بوده است و تلاش شده است که این پدیده با استفاده از توزیع‌های آماری نظیر: توزیع نمایی، نرمال، وایبل مدلسازی شود [۱۷].

گرفت [۱۹]. در این حالت استفاده از روش های ناپارامتریک مفید است.

تکنیک های ناپارامتریک مانند میانگین تابع تجمعی [۲۰-۲۱] و پارامترهای مبتنی بر مدل های تخمین قابلیت اطمینان مختلف که با انواع مختلف سانسور داده ها سروکار دارند، در کارهای پیشین موجود هستند. اکثر مدل های سانسور شده موجود، تعمیر را کامل یا حداقل می دانند [۲۲-۲۴]. در این مقاله تلاش شده است بر روی داده های تجربی حاصل از آزمون عمر، تحلیل لازم صورت گیرد و مقایسه ای بین نتایج این روش ها انجام شود.

۱-۲- حالت های خرابی

خرابی بیانگر عدم توانایی یک محصول در ارائه خدمات یا انجام وظایف و عملکرد مورد انتظار است. لذا ارائه تعریف صحیح خرابی در فرآیند تحلیل قابلیت اطمینان ضروری است. عدم توانایی در انجام وظیفه اغلب بخاطر از کار افتادن اجزای سیستم رخ می دهد. در نگاه کلان همه عوامل و حالات خراب شدن را می توان مشابه در نظر گرفت و یک تابع چگالی احتمال خرابی ثابت را برای محاسبه قابلیت اطمینان پیشنهاد داد. این روش فقط یک مقدار متوسط برای عمر و نرخ خرابی ارائه می دهد و تفکیکی بین حالات و عوامل خرابی در نظر نمی گیرد. برای تحلیل دقیق تر و بهره گیری مناسب تر از نتایج یک آزمون، بهتر است حالات خرابی مختلف تفکیک شده و احتمال موفقیت سیستم بدون وقوع یک خرابی خاص محاسبه شود. مثلاً خرابی های بخش مکانیکی از خرابی های بخش الکتریکی تفکیک شده و قابلیت اطمینان آنها را با فرض مستقل بودن این حالات خرابی براساس توابع احتمالی توأم از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$R(t) = R(Elec) \times R(Mech) \quad (4)$$

اگرچه جداسازی و مستقل در نظر گرفتن خرابی ها روش ساده و پرکاربردی است ولیکن، نمی توان از برهمکنش آنها به راحتی صرف نظر کرد. مثلاً وقتی داده های آزمون بخش الکتریکی بررسی می شود، در همان زمان، بخش مکانیک هم در حال کار بوده که بخاطر خرابی در بخش الکتریک فرآیند متوقف شده و یا حتی در حالی که بخش مکانیک اصلاً خراب نشده، سیستم از چرخه آزمون خارج شده است.

در ادامه روش های پیشنهادی تشریح شده و نتایج آزمون عمر کولر استرلینگ به کمک آنها تحلیل می شود.

۲-۲- تحلیل قابلیت اطمینان و عمر

۲-۲-۱- روش نلسون - آرن در تحلیل قابلیت اطمینان

روش ناپارامتریک و دلایل بهره گیری از آن به اختصار در بخش قبل بیان شد. یکی از تکنیک های مفید استفاده از روش نلسون-آرن برای تحلیل ناپارامتریک سیستم ها و محاسبه قابلیت اطمینان است. این روش وقتی زمان های خرابی و تعمیر سیستم از فرآیند پواسون ناهمگن تبعیت می کند، مفید است. اگر چند سیستم مشابه همزمان مشغول به کار باشند و تعداد خرابی های رخ داده، ثبت شود، آنگاه میانگین تعداد خرابی های مورد انتظار برابر است با: تعداد تعداد خرابی های رخ داده در یک بازه $(\sum_{i=1}^n N_i(t))$ تقسیم بر تعداد سیستم های در حال کار در آن بازه (n) . لذا میانگین خرابی $(W(t))$ به صورت رابطه زیر بیان می شود [۱۵، ۱۲].

$$\hat{W}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n N_i(t)}{n} \quad (5)$$

این تقریب می تواند به صورت زیر بازنویسی شود.

$$\hat{W}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n N_i(t)}{n} = \sum_{\{i; T_i \leq t\}} \frac{1}{n} = \sum_{i \geq 1} \frac{1}{n}$$

فرض کنید تعداد n_1 سیستم در بازه $(0, t_1]$ در حال کار باشند و در بازه $t > t_1$ تعداد سیستم ها n_2 است. اگر تعداد خرابی های رخ داده در بازه $(0, t]$ برابر با $N(t)$ باشد. میانگین خرابی مورد انتظار برابر است با:

$$\hat{W}(t) = \frac{N(t)}{n_1} = \sum_{\{i; T_i \leq t_1\}} 1/n_1, \text{ when } 0 \leq t \leq t_1 \quad (6)$$

وقتی $t > t_1$ باشد آنگاه میانگین خرابی های مورد انتظار براساس رابطه $W(t) - W(t_1) = \int_{t_1}^t \lambda(t) dt$ به صورت زیر تقریب زده می شود:

$$\frac{N(t) - N(t_1)}{n_2} = \sum_{\{i; t_1 < T_i \leq t\}} 1/n_2; \text{ when } t > t_1 \quad (7)$$

برآورد کلی میانگین تعداد خرابی به صورت زیر خواهد بود:

$$\hat{W}(t) = \sum_{\{i; T_i \leq t_1\}} 1/n_1 + \sum_{\{i; t_1 < T_i \leq t\}} 1/n_2 \quad (8)$$

فرض کنید که $M(s)$ بیانگر تعداد سیستم های فعال قبل از لحظه s باشند. برآورد کننده نلسون-آرن برای میانگین تعداد خرابی مورد انتظار به صورت زیر خواهد بود [۲۲]:

$$\hat{W}(t) = \sum_{\{i; T_i \leq t\}} \frac{1}{M(T_i)} = \sum_{i \geq 1} \frac{1}{M(T_i)} L[T_i \leq t] \quad (9)$$

$$\lambda(t) = \frac{d}{dt} E[N(t)] = \gamma \beta t^{\beta-1} \quad (16)$$

قابلیت اطمینان به کمک رابطه (۳) برآورد می‌گردد و مقدار میانگین عمر مورد انتظار نیز برابر است با:

$$\hat{\alpha} = T/n^{1/\beta}$$

۳-۲-۲- تجزیه و تحلیل شکست مختلط

در سیستم‌های صنعتی و عملیاتی به طور معمول یک سیستم از چند قطعه مختلف با طراحی، ساختار و وظیفه متفاوت تشکیل شده است و در طول آزمون عمر مکانیزم‌های شکست مختلف برای یک مجموعه نمونه اتفاق می‌افتد. برای این سیستم‌ها بهتر است که مکانیزم‌های خرابی را تفکیک شود و هر مکانیزم خرابی را مستقل تحلیل کرد و سپس نتایج را ادغام کرد. مشکل اصلی، عدم امکان تفکیک مکانیزم‌ها و انجام آزمون مستقل بدون تحریک مکانیزم خرابی دیگر است. وقتی سیستم فعال است همه مکانیزم‌های آن فعال هستند و برحسب تصادف (فرآیند تصادفی) یکی از آنها از کار می‌افتد. این همزمانی اگر همراه با توقف و از رده خارج ساختن کل نمونه باشد، منجر به تولید داده سانسور شده برای آن حالت خرابی شده، ولیکن برای حالت خرابی دیگر داده کامل است. اگر این آزمون عمر به صورت شتابدار و تسریع شده باشد، پیچیدگی تحلیل افزایش می‌یابد.

با توجه به این‌که اغلب سیستم‌ها دارای دو بخش اصلی مکانیکی و الکتریکی هستند، می‌توان خرابی‌ها را حداقل در دو گروه متفاوت در نظر گرفت که وقتی سیستم فعال است هر دو بخش کار می‌کنند و دچار تخریب تدریجی می‌شوند. در این سیستم با این دیدگاه، برای سادگی کار خرابی‌ها و شکست‌های این دو بخش را از هم تفکیک کرد و قابلیت اطمینان هر بخش با در نظر گرفتن موضوع داده سانسور شده و تعداد کم نمونه‌ها بررسی می‌شود. برای تحلیل قابلیت اطمینان از سه روش نلسون-آلن، کاپلان-مایر و کرو استفاده شده و نتایج مقایسه می‌شود.

۳-۲-۳- مطالعه موردی

برای تشریح کاربرد روش پیشنهادی در بخش قبل، چند کولر استرلینگ که در صنعت الکتروپتیک کاربرد دارد، انتخاب شده و آزمون عمر بر روی چهار عدد انجام شد. این مجموعه به طور همزمان تحت آزمون قرار داده شد و با پایش جریان مصرفی و دمای سطح آن، وقوع خرابی تشخیص داده می‌شد. این دو پارامتر به دلیل اندازه‌گیری راحت‌تر و توانایی توصیف شرایط تجهیز

که L تابعی پله ای است و مقدار صفر و یک را برحسب زمان به صورت زیر دارد:

$$L(t) \leq 1, \\ L(t) > 0$$

واریانس این مقدار میانگین برابر است با:

$$\text{var}(\hat{W}(t)) \approx \hat{\sigma}^2(t) = \sum_{\{i; T_i \leq t\}} 1/Y(T_i)^2 \quad (10)$$

و قابلیت اطمینان سیستم برابر است با:

$$R(t) = \text{EXP}(-\hat{W}(t)) \quad (11)$$

۲-۲-۲- روش کرو در تحلیل قابلیت اطمینان

برای پرداختن به ویژگی‌های قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده‌ی تعمیرپذیر، اغلب به جای استفاده از یک توزیع از یک فرآیند استفاده می‌شود. محبوب‌ترین مدل فرآیند، مدل قانون توان^۶ یا مدل توانی است [۲۲]. این مدل در شرایط حداقل تعمیر بسیار عملی و کاربردی است. آقای کرو روابط مربوط به مدل توانی را به فرم دیگری ارائه کرده است که در ادامه بیان می‌شود. اگر این سیستم برای زمان T ، $N(T)$ مرتبه شکست و خرابی در بازه صفر تا T را ثبت کند به طوری که $N(T)$ یک عدد تصادفی است. پس میانگین مقدار خرابی براساس مدل توانی برابر است با: $E[N(T)] = \gamma T^\beta$. در نتیجه تابع شدت فرآیند برابر است با [۲۵، ۱۵]:

$$\lambda(t) = \frac{d}{dt} E[N(t)] = \gamma \beta t^{\beta-1} \quad (12)$$

براین اساس احتمال رخ دادن n خرابی ($n \geq 1$) در بازه t برابر است با:

$$\text{Pr}[N(t) = n] = \frac{(\gamma t^\beta) \exp(-\gamma t^\beta)}{n!} \quad (13)$$

برآورد و تخمین پارامترهای γ و β برای تابع شدت خرابی در مدل کرو بر اساس یک نمونه تصادفی از سیستم انجام می‌شود. اگر زمان شروع همه آزمون‌ها صفر و زمان پایان دادن به همه برابر T باشد، آنگاه پارامترهای γ و β به فرم به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{q=1}^K N_q}{\sum_{q=1}^K \sum_{i=1}^{N_q} \ln\left(\frac{T}{X_{iq}}\right)} \quad (14)$$

و

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{q=1}^K N_q}{K T^{\hat{\beta}}} \quad (15)$$

در نتیجه تابع شدت خرابی به صورت زیر است:

خرابی، یک آستانه برای پارامترها تعیین شد و هنگام رسیدن شدت جریان مصرفی یا دما به آن آستانه سیستم متوقف شده و بررسی می‌شد و نوع خرابی بعد از بررسی فنی مشخص می‌شد. به طور مثال اگر دمای به ۵۰ درجه سانتی گراد افزایش می‌یافت یا شدت جریان مصرفی ۵۰ درصد بیش از لحظه آغاز تست بود، تست متوقف شده و با بازکردن و دمونتاژ سیستم، نوع آسیب مشخص می‌شد.

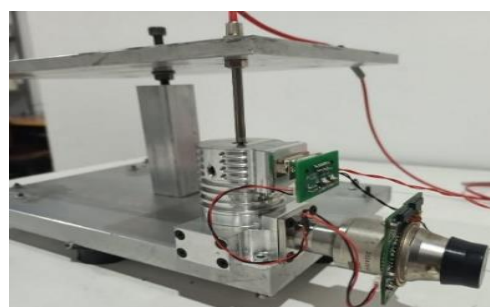
پس از هر خرابی سیستم اصلاح شده و ایراد مربوطه رفع می‌گردد و سیستم مجدد در شرایط آزمون قرار می‌گیرد. این تعمیر به صورت حداقل تعمیر^۷ مورد نیاز انجام شده است. کلیه آزمون‌ها پس از ۱۵۰۰ ساعت متوقف شده‌اند. زیرا در این بازه زمانی با شروع تست، پارامترهای کنترلی نسبت به سایر زمان‌ها سریعتر از محدوده مجاز خارج می‌شدند و بیانگر لزوم تعمیر اساسی است. این روش آزمون، توقف تست براساس زمان به عنوان تست سانسور شده نوع اول در منابع علمی مهندسی قابلیت اطمینان شناخته می‌شود. با فرض ناچیزبودن زمان تعمیر در مقایسه با زمان عملکرد، اطلاعات حاصله در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱) نمایشگر زمان خرابی ثبت شده برای کولر استرلینگ (براساس ساعت) است. برای هر کولر دو نوع خرابی کلی مدنظر قرار گرفته و زمان وقوع آنها ثبت شده است. به عنوان مثال برای کولر شماره ۱، در زمان ۱۰۰ ساعت یک خرابی الکتریکی رخ داده و سپس تعمیر شده و با ادامه آزمون در لحظه ۲۰۴ ساعت به واسطه اشکال مکانیکی، کارکرد کولر متوقف شده است و پس از تعمیر مجدد، آزمون ادامه یافته و در زمان ۳۰۰ ساعت مجدد به علت خرابی بخش الکتریکی توقف ایجاد شده است و به همین ترتیب تا آخرین خرابی ثبت شده در زمان ۱۲۵۰ ساعت. برای سایر کولرها نیز به همین گونه اطلاعات ثبت شده است. بعد از هر خرابی کولر دقیقاً بررسی شده تا دلیل خرابی شناسایی شده و دسته بندی نوع خرابی انجام شود. در ادامه تحلیل‌های انجام شده با توجه به اطلاعات تجربی کسب شده، ارائه می‌شوند.

جدول (۱): زمان های خرابی ثبت شده برای کولر استرلینگ (براساس ساعت)

کولر شماره ۱		کولر شماره ۲		کولر شماره ۳		کولر شماره ۴	
خرابی مکانیکی	خرابی الکتریکی	خرابی مکانیکی	خرابی الکتریکی	خرابی مکانیکی	خرابی الکتریکی	خرابی مکانیکی	خرابی الکتریکی
	100		52		153		221
204			140	388		573	
	300		421		678	843	
	500	755		910			1405
800			1500		1372		
1250							

استفاده شدند. هر چند روش تحلیل ارتعاش نیز برای پایش وضعیت موتور در برخی منابع توصیه شده است [۲۶] ولیکن در مقایسه با روش استفاده شده در این تحقیق هزینه بیشتری نیاز دارد. برای این آزمون یک استند تست طراحی شد که شدت جریان مصرفی را با دقت ۲ میلی آمپر و دما را با دقت ۰/۰۵ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری و ثبت می‌کند و موتور را در یک محل معین ثابت نگه می‌دارد. بخاطر اهمیت انتقال حرارت و الزامات عملیاتی موتور در حین استفاده صنعتی، دمای محیط آزمایشگاه در بازه ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد حفظ شده است. شکل (۴) نمونه‌ای از موتور در حال تست را نمایش می‌دهد و شکل (۵) نیز دستگاه دیتالاگر را نمایش می‌دهد.

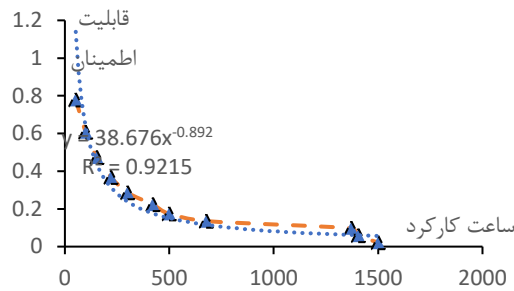


شکل (۴): استند تست



شکل (۵): دستگاه ثبت داده (دیتالاگر) مورد استفاده

با پایش این پارامترها و تعیین آستانه خرابی برای هریک، لحظه وقوع خرابی در سیستم تعیین می‌شود. با توجه به مکانیزم خرابی نظیر سایش قطعات متحرک مکانیکی، لحظه مشخصی را نمی‌توان برای خرابی درنظر گرفت زیرا سایش به مرور اتفاق افتاده و پارامترهای کنترلی را به مرور تغییر می‌دهد. لذا برای تعیین



ب- قابلیت اطمینان بخش الکتریکی کولر
 شکل (۷): قابلیت اطمینان سیستم براساس حالات خرابی مکانیکی و الکتریکی

اگر از مقادیر حاصله، برای محاسبه و برآورد پارامترهای شکل و اندازه در توزیع های آماری استفاده شود. با فرض تبعیت داده های خرابی از توزیع وایبل برای هر حالت خرابی می توان مقادیر مربوطه را محاسبه کرد. رابطه قابلیت اطمینان براساس توزیع وایبل به صورت زیر است:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (17)$$

مقادیر پارامتر شکلی و اندازه توزیع وایبل براساس روش ماکزیمم راست نمایی برای داده های ثبت شده، برابر است با:
 خرابی های مکانیکی $\alpha = 667, \beta = 1.212$
 خرابی های الکتریکی $\alpha = 185, \beta = 0.852$

جدول (۲): محاسبه قابلیت اطمینان بخش مکانیک براساس روابط نلسون-آلن

قابلیت اطمینان	w	نمو	تعداد سیستم	زمان خرابی مکانیکی (ساعت)
0.778801	0.25	0.25	4	204
0.606531	0.5	0.25	4	388
0.472367	0.75	0.25	4	573
0.367879	1	0.25	4	755
0.286505	1.25	0.25	4	800
0.22313	1.5	0.25	4	843
0.173774	1.75	0.25	4	910
0.135335	2	0.25	4	1250

در نتیجه میانگین عمر مورد انتظار برای بخش مکانیکی ۴۵۵ ساعت و برای بخش الکتریکی ۳۰۳ ساعت برآورد می گردد.

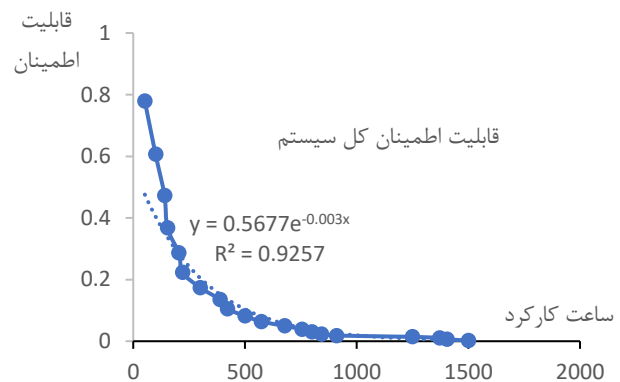
۲-۳-۲- مقایسه نتایج روش های مختلف

در راستای ارزیابی نتایج آزمون تجربی و یافتن مناسب ترین روش مدلسازی داده، نتایج حاصل از آزمون عمر با استفاده از روش های مختلف محاسبه و با هم مقایسه می شوند. برای

۲-۳-۱- روش نلسون-آلن

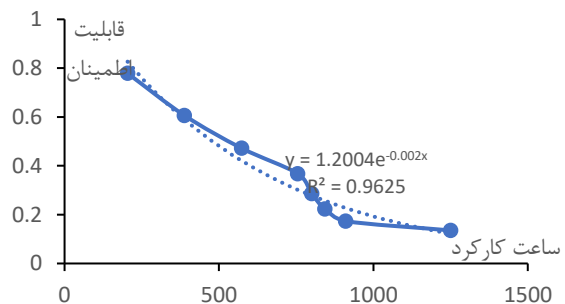
همانگونه که در بخش های قبل بیان شد، این روش درحالتی که تعداد شکست ها و خرابی ها کم و حجم نمونه کم باشد، قابل استفاده است. در این روش باید متوسط خرابی ها و خرابی تجمعی را مدنظر قرارداد. این فرآیند یکبار برای کل سیستم مستقل از نوع خرابی انجام شده و یکبار نیز با در نظر گرفتن نوع خرابی و تفکیک حالات خرابی محاسبه می شود. شکل (۶) روند تغییرات قابلیت اطمینان کل سیستم را نشان می دهد.

در این بخش، قابلیت اطمینان با تفکیک حالات خرابی محاسبه می شود. به عنوان نمونه، برای حالات خرابی مربوط به بخش مکانیکی محاسبات مربوطه در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل (۶): قابلیت اطمینان کل سیستم بر اساس روش نلسون - آلن

مشابه همین روند، برای تحلیل خرابی های بخش الکتریکی انجام شده و محاسبات ارائه می شود. شکل (۷) تغییرات قابلیت اطمینان را برای هر حالت خرابی نشان داده و به کمک رگرسیون توانی (فرآیند قانون توان^۸)، رابطه حاکم بر خرابی استخراج شده است.



الف - قابلیت اطمینان بخش مکانیکی کولر

500	0.082	0.047927	0.151971	0.070282	0.126671
600	0.06	0.027201	0.089613	0.041496	0.09384
700	0.049	0.015489	0.022056	0.024465	0.069519
800	0.0301	0.008841	0	0.014402	0.051501
900	0.01835	0.005056	0	0.008466	0.038153
1000	0.017	0.002896	0	0.004969	0.028264
1200	0.014	0.000953	0	0.001704	0.015512
1300	0.011	0.000547	0	0.000996	0.011491
1500	0.0022	0.00018	0	0.00034	0.00631

مدل کرو نیز مقادیر ۲۰۰ ساعت و ۴۵۵ ساعت را به ترتیب برای بخش الکتریک و مکانیک ارائه می‌کند، که تقریباً در بازه میانی دو روش قبل قرار دارد. به نظر می‌رسد با توجه به تعداد کم نمونه‌ها و اطلاعات خرابی، این پراکندگی در نتایج رخ می‌دهد. در مدلسازی با روش کاپلان-مایر که مقادیر زمانی بزرگتری را ارائه می‌دهد، فرض شده که سیستم پس از هر تعمیر به صورت یک سیستم نو شروع به کار می‌کند ولیکن در دو روش دیگر فرض حداقل تعمیر استفاده شده است و پس از هر تعمیر، قابلیت اطمینان به وضعیت سیستم نو (مقدار یک) نمی‌رسد و میزان قابلیت اطمینان به مقدار آن به صورت دقیق یک لحظه پیش از شکست باز می‌گردد. لذا مقادیر برآورد شده توسط این دو روش احتمالاً به واقعیت نزدیک‌تر هستند.

با توجه به تعداد کم نمونه‌ها و عدم قطعیت در برآوردها، به نظر می‌رسد در حالت بدبینانه و محتاطانه، بازرسی بعد از ۱۳۰ ساعت را برای حوزه الکترونیک و بازرسی بعد از ۴۵۰ ساعت کارکرد را برای بخش مکانیکی را باید توصیه کرد. این بسیار بهتر از آن است که بر مبنای قضاوت کلی سیستم هر ۱۳۰ ساعت (سناریوی بدبینانه) کلیه بخش‌ها بازرسی شوند. در نتیجه برنامه‌ریزی تعمیرات براساس این نتیجه، از نظر اقتصادی و عملیاتی منطقی‌تر است.

۳- نتیجه‌گیری

سیستم‌های پیچیده اغلب از چندین المان مختلف تشکیل شده و دارای حالات خرابی متعدد هستند. مدلسازی قابلیت اطمینان یک سیستم پیچیده همواره، مورد توجه بوده و تلاش شده با استفاده از روش‌های مختلف روابط مورد نیاز استخراج شود. زمانی که تعداد داده‌ها و نمونه‌ها کم و به صورت ناکامل هستند، استفاده از روش‌های ناپارامتریک برای تحلیل توصیه شده است. در این مقاله برای تحلیل قابلیت اطمینان مجموعه موتور (کولر) استرلینگ که در صنایع فوق سرد (کرایونیکی) مورد استفاده قرار می‌گیرد، چهار نمونه برای آزمون عمر انتخاب شد و به کمک پارامتر دما و شدت جریان مصرفی، این سیستم‌ها

مقایسه، از روش رگرسیون غیرخطی نیز برای تخمین تابع قابلیت اطمینان استفاده شده است که هیچ توزیع خاصی را تبعیت نکرده و فقط رابطه ریاضی را براساس داده‌های ریاضیاتی خرابی را بیان کرده است (رابطه $EXP(-0.003397 * t)$ جدول (۳) نتیجه این محاسبات را نشان می‌دهد.

مقادیر جدول (۳) نشان دهنده اختلاف معنادار، بین نتایج روش‌های محاسباتی است. رابطه کاپلان-مایر در کلیه بازه‌ها تا زمانی که مقدار قابلیت اطمینان آن صفر شود، مقادیر قابلیت اطمینان را بیش از سایر روش‌ها ارائه می‌کند و به نظر حداکثر مقدار ممکن را ارائه می‌کند و رابطه نلسون-آلن برای سیستم (بدون تفکیک حالات خرابی) تقریباً کمترین مقدار را بیان می‌کند. به عنوان مثال اگر لازم باشد میانه عمر سیستم (زمانی که قابلیت اطمینان ۰/۵ است) برای انجام یک فرآیند تعمیراتی و اصلاحی تعیین شود.

براساس روش کاپلان-مایر این بازه حدود ۲۰۰ ساعت کارکرد است، برای روش نلسون-آلن زمان ۱۳۰ ساعت و برای رابطه کرو حدود ۱۳۵ ساعت و برای رابطه مبتنی بر رگرسیون حدود ۲۰ ساعت است. زمان مناسب چه مقدار است؟ برای پاسخ به این سوال، پیشنهاد می‌شود برای هر نوع خرابی یک زمان بازرسی یا تعمیر در نظر گرفته شود. با توجه به تحلیل انجام شده و تفکیک نوع خرابی‌ها، زمان اصلاح در بخش الکتریکی ۱۳۰ ساعت و برای بخش مکانیکی ۵۰۰ ساعت پیشنهاد می‌شود (روش نلسون-آلن). اگر از روش کاپلان-مایر استفاده شود، برای حالات خرابی بخش الکتریک، زمان ۲۰۰ ساعت و برای بخش مکانیک زمان ۵۵۰ ساعت پیشنهاد می‌شود. اگر این مقادیر را با مقادیر مربوط به عدم تفکیک مقایسه شوند، می‌توان نتیجه گرفت که تقریباً کوچکترین زمان مربوط به حالات مختلف خرابی در هر دو روش به عنوان زمان مورد نظر برای بازرسی در حالت کلی ارائه می‌شود.

جدول (۳): قابلیت اطمینان سیستم براساس روش‌های مختلف

رگرسیون غیرخطی	حاصل ضرب مکانیک و الکتریک - رابطه کرو	حاصل ضرب مکانیک و الکتریک - رابطه کاپلان-مایر	حاصل ضرب مکانیک و الکتریک - رابطه نلسون-آلن	رابطه نلسون-آلن (ساعت)	زمان کارکرد (ساعت)
0.53464	0.886054	0.92	0.848303	0.75	20
0.420563	0.575039	0.698925	0.500407	0.6065	100
0.31156	0.339484	0.509657	0.272271	0.2865	200
0.23081	0.200909	0.304463	0.151171	0.1738	300
0.170988	0.118886	0.235246	0.084834	0.12	400

- and optimization for hot IR detectors,” in *Proc. SPIE*, vol. 9070, Baltimore, MD, USA, 2014.
- [5] A. Filis, N. Pundak, Y. Zur, et al., “Cryocoolers for infrared missile warning systems,” in *Proc. SPIE, Infrared Technol. Appl. XXXVI*, vol. 7660, Art. no. 76602L, Orlando, FL, USA, 2010.
 - [6] J. M. Cauquil, C. Seguinéau, J.-Y. Martin, and T. Benschop, “Reliability improvements on Thales RM2 rotary Stirling coolers: Analysis and methodology,” in *Proc. SPIE*, vol. 9821, Baltimore, MD, USA, 2016.
 - [7] University of Oxford, “Cryocoolers for space application.” Accessed: May 10, 2025. [Online]. Available: <https://eng.ox.ac.uk/cryogenics/research/cryocoolers-for-space-application>
 - [8] M. A. Farsi, *Test Stand Design and Failure Analysis of Stirling Coolers*. ARI Research Report, 2023. (in Persian).
 - [9] J. S. Reed and G. D. Peskett, “Development of a low-power Stirling cycle cryocooler for space applications,” in *Cryocoolers*, R. G. Ross, Ed. Boston, MA, USA: Springer, 2003, ch. 12. doi: 10.1007/0-306-47919-2_4.
 - [10] T. A. Arslan and T. Kocakulak, “A comprehensive review on Stirling engines,” *Eng. Perspect.*, vol. 3, no. 3, pp. 42–56, 2023.
 - [11] R. G. Ross Jr., *Cryocooler Reliability and Redundancy Considerations for Long-Life Space Missions*. Boston, MA, USA: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001.
 - [12] G. Hu and F. Huffer, “Modified Kaplan–Meier estimator and Nelson–Aalen estimator with geographical weighting for survival data,” *Geogr. Anal.*, vol. 52, no. 1, pp. 28–48, 2020.
 - [13] E. Colosimo, F. Ferreira, M. Oliveira, and C. Sousa, “Empirical comparisons between Kaplan–Meier and Nelson–Aalen survival function estimators,” *J. Stat. Comput. Simul.*, vol. 72, no. 4, pp. 299–308, 2002.
 - [14] A. Erdmann, J. Beyersmann, and E. Bluhmki, “Comparison of nonparametric estimators of the expected number of recurrent events,” *Pharm. Stat.*, vol. 23, no. 3, pp. 339–369, 2024.
 - [15] M. Zarourati, M. Mirshams, and M. Tayefi, “Active under-actuation fault-tolerant backstepping attitude tracking control of a satellite with interval error constraints,” *Adv. Control Appl. Eng. Ind. Syst.*, vol. 215, 2024, doi: 10.1002/adc2.215.
 - [16] M. Moaveni-Tajoddin, M. A. Farsi, and I. Bahman Jahromi, “Optimal sensors positioning by using value of information method,” *Int. J. Reliab. Risk Saf. Theory Appl.*, vol. 6, no. 1, pp. 87–96, 2023, doi: 10.22034/IJRRS.2023.6.1.10.
 - [17] M. A. Farsi, *Principles of Reliability Engineering*, 2nd ed. Tehran, Iran: Symayeh Danesh, 2022. (in Persian).
 - [18] M. Modarres, M. P. Kaminskiy, and V. Krivtsov, *Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.
 - [19] W. B. Nelson, *Recurrent Events Data Analysis for Product Repairs, Disease Recurrences, and Other Applications*. Philadelphia, PA, USA: SIAM, 2003.
 - [20] D. Trindade and N. S. Nathan, “Analysis of repairable systems with severe left censoring or truncation,” *Qual. Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 329–338, 2018.
 - [21] W. Si, Q. Yang, L. Monplaisir, and Y. Chen, “Reliability analysis of repairable systems with incomplete failure time data,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 67, no. 3, pp. 1043–1059, 2018.
 - [22] P. Chen and Z.-S. Ye, “Random effects models for aggregate lifetime data,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 66, no. 1, pp. 76–83, 2017.

پایش شده‌اند و خرابی‌های آن ثبت شد. در راستای تحلیل، خرابی‌های این مجموعه به دو بخش مکانیکی و الکتریکی تقسیم شد. سپس، خرابی‌ها و سیستم با استفاده از تکنیک‌های مختلف مهندسی قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تحلیل نشان می‌دهد، در صورت تفکیک حالات خرابی و محاسبه قابلیت اطمینان براساس نوع خرابی‌ها، نتایج حاصله منطقی‌تر است و برنامه‌ریزی تعمیرات و بازرسی صحیح سیستم تعمیرپذیر، امکانپذیر است. با توجه نتایج تحلیل، استفاده از روش نلسون–آلن و کرو وقتی تعداد نمونه کم است، نتایج منطقی‌تری نسبت به روش کاپلان–مایر ارائه می‌نماید. این تحقیق برای نمونه‌های پیچیده‌تر با حالات خرابی بیشتر باید تکمیل شود. همچنین برای استفاده در مأموریت‌های هوافضایی طولانی مدت، تکنولوژی ساخت کولر استرلینگ باید ارتقاء یابد. همچنین به علت پیچیدگی سیستم پیشنهاد می‌شود، مکانیزم خرابی بویژه سایش در تحقیقات آتی با استفاده از مدل‌های فیزیک خرابی بررسی شود.

تعارض منافع

“هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.”

تشکر و قدردانی

نویسنده مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از سردبیر محترم و داوران ناشناس نشریه علمی علوم، فناوری و کاربردهای فضایی به پاس بررسی دقیق، نظرات سازنده و پیشنهادهای ارزشمندی که منجر به ارتقای کیفیت علمی این اثر گردید، ابراز می‌دارد.

مراجع

- [1] M. R. Azmoodeh, A. Keshavarz, A. Batooei, H. Saberinejad, M. Payandehdoost, and H. Keshkar, “Experimental study and thermal analysis of a gamma-type Stirling engine for multi-objective optimization,” *Int. J. Automot. Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 3281–3294, 2020.
- [2] E. Hassanzadeh, M. Aliehyaei, S. Jafari Mehrabadi, A. Mohammadi, and H. Mazaheri, “Experimental investigation on the gamma-model Stirling engine for cooling production using various gases,” *J. Engine Res.*, vol. 59, pp. 17–28, 2020. (in Persian).
- [3] N. Pundak, Z. Porat, M. Barak, Y. Zur, and G. Pasternak, “Field reliability of Ricor microcoolers,” in *Proc. SPIE, Infrared Technol. Appl. XXXV*, vol. 7298, Art. no. 72983I, Orlando, FL, USA, 2009.
- [4] A. Katz, V. Segal, A. Filis, Z. B. Haim, I. Nachman, E. Krimnuz, and D. Gover, “Ricor’s cryocoolers development

- [23] M. Kijima, "Some results for repairable systems with general repair," *J. Appl. Probab.*, vol. 26, no. 1, pp. 89–102, 1989.
- [24] M. Luz Gámiz, K. B. Kulasekera, N. Limnios, and B. H. Lindqvist, *Applied Nonparametric Statistics in Reliability*. New York, NY, USA: Springer, 2011.
- [25] L. H. Crow, "Methods for reducing the cost to maintain a fleet of repairable systems," in *Proc. Annu. Reliab. Maintainab. Symp. (RAMS)*, USA, 2003, pp. 392–399.
- [26] S. Shuhei, K. Tanaka, Y. Sato, K. Shinozaki, and S. Mitani, "Evaluation method for effect of active vibration control on cooling performance of Stirling cooler," *Cryogenics*, vol. 117, Art. no. 103308, 2021.