

بررسی اثر دو روش آماده سازی متفاوت در ساخت لوله های حرارتی فضائی بر طول عمر و محاسبه قابلیت اطمینان بر اساس تست شتاب

ایثار دشتی گوهری^۱، سعید اصغری^۲، عبدالله فانی^۳، امیر امینی^۴ و محمد صادق برنجکوب^۵

۱- پژوهشگر، پژوهشگاه فضائی ایران، پژوهشکده مواد و انرژی، اصفهان، ایران، i.dashti@isrc.ac.ir

۲- دانشیار، پژوهشگاه فضائی ایران، پژوهشکده مواد و انرژی، اصفهان، ایران، s.asgharee@isrc.ac.ir

۳- پژوهشگر، پژوهشگاه فضائی ایران، پژوهشکده مواد و انرژی، اصفهان، ایران، a.fani@isrc.ac.ir

۴- پژوهشگر، پژوهشگاه فضائی ایران، پژوهشکده مواد و انرژی، اصفهان، ایران، a.amini@isrc.ac.ir

۵- پژوهشگر، پژوهشگاه فضائی ایران، پژوهشکده مواد و انرژی، اصفهان، ایران، m.berenjkoob@isrc.ac.ir

چکیده

هدف از این پژوهش دستیابی به روشی جهت تعیین زمان منتهی به خرابی لوله های حرارتی است. لوله های حرارتی از المان های کنترل حرارت در سیستم های گوناگون از جمله ماهواره ها هستند. در ابتدا دو روش برای سستشوی لوله های حرارتی از منظر طول عمر مقایسه گردید. پس از دستیابی به بهترین روش، با توجه به انجام تست های طول عمر در بازه های زمانی بسیار زیاد، از روش های شتاب دهنده برای تسریع در دستیابی به زمان منتهی به خرابی یک المان استفاده شده است. با توجه به مکانیسم عملکرد لوله حرارتی، دمای تشدید شده سبب افزایش سرعت در خرابی آن خواهد شد. در حین عملکرد، داده ها بصورت مستمر جمع آوری شده و مدل ریاضی آرنیوس برای چگونگی تخریب یک لوله حرارتی در دمای مشخص ایجاد می گردد. سپس با جمع آوری چندین داده از زمان تخریب لوله های حرارتی که در دمای یکسان کار می کنند، با کمک نرم افزار آماری MINITAB تابع توزیع و قابلیت اطمینان لوله ها محاسبه می شود.

واژه های کلیدی: لوله حرارتی، قابلیت اطمینان، طول عمر، تست شتاب، زمان منتهی به خرابی

مقدمه

متداول در بخش مدیریت حرارت سامانه های فضایی لوله های حرارتی هستند. لوله های حرارتی از المان هایی هستند که افت عملکرد آن می تواند کارایی کل ماهواره را تحت تاثیر قرار دهد. به همین دلیل بررسی طول عمر لوله های حرارتی و قابلیت اطمینان آن حتی برای سازندگان مطرح این محصول در دنیا چالشی بروز و جدی است. در اسناد این شرکت ها همچنان طرح های اندازه گیری طول عمر در حال بروزسانی است و این سازندگان آرشو هایی از لوله های حرارتی با سابقه تست طول عمر ۳۰ ساله دارند. بیکر در ۱۹۷۳ اولین کار آکادمیک روی طول عمر لوله های حرارتی را انجام داد. آنها ۱۵ عدد لوله حرارتی

یکی از عوامل مهم در بالا بودن سطح تکنولوژی سامانه های فضایی، طول عمر و قابلیت اطمینان آنان است. المان های بکار گرفته در صنایع مورد استفاده در سطح زمین عمدتاً قابل تعمیر، تعویض و یا در صورت عدم محدودیت وزنی امکان ایجاد سیستم های موازی جایگزین را دارند. در الزامات موجود برای سامانه های فضایی، طول عمر المان ها مشخص شده است، که کارکرد مناسب آن در این بازه زمانی بدلیل هزینه های هنگفت در ساخت و پرتاب ماهواره بسیار حائز اهمیت است. از المان های

شده استخراج می-شوند. این روش برای عملکرد یک لوله حرارتی در یک دمای معین مفید بوده و پارامترهای بدست آمده در همان دما قابل استناد می-باشند. در واقع این یک مدل دو پارامتری است. مدل های وابسته به زمان بسیاری برای تخریب وجود دارند (جدول ۱).

جدول ۱. مدل های تخریب وابسته به زمان

نام مدل	رابطه ریاضی
مدل قانون توان	$S = S_0[1 + B_0 t^m]$
مدل نمائی	$S = S_0 e^{B_0 t}$
مدل لگاریتمی	$S = S_0 [1 \pm \ln(B_0 t + 1)]$

با این حال، یکی از سه شکل قانون توان، قانون نمائی و یا قانون لگاریتمی به طور کلی استفاده می شوند که قانون توان بوضوح بیشتر استفاده می-شود. با این حال، اگر مدل قانون توان برازش به نسبت ضعیفی برای داده های تخریب ارائه دهد، آنگاه باید دو مدل دیگر مورد بررسی قرار گیرند [۵].

در زمانی که در الزامات عملکرد یک لوله حرارتی در دمای معین مد نظر باشد، این روش مطلوب است. بر اساس این روش با بازنویسی رابطه (۲)، رابطه (۳) برای تعیین زمان منتهی به خرابی (TF) حاصل می-گردد. در سایر مدل ها زمان منتهی به خرابی از جدول ۲ محاسبه می-گردد.

$$TF = \left[\frac{1}{B_0} \left(\frac{S - S_0}{S_0} \right) \right]^{1/m} \quad (3)$$

قانون آرنیوس

در مواردی که الزامات دمایی لوله حرارتی یک محدوده دمایی باشد، مدل دیگری برای زمان منتهی به تخریب ارائه می شود. این مدل به نام مدل نمائی (آرنیوس) مشهور است (معادله ۴). در واقع این مدل زمان منتهی به خرابی المان را به دمای عملکرد المان مرتبط می-سازد.

$$TF = A_0 \exp\left(\frac{Q}{KT}\right) \quad (4)$$

جدول ۲. مدل زمان های منتهی به خرابی برای لوله حرارتی

نام مدل	رابطه ریاضی
مدل قانون توان	$TF = \left[\frac{1}{B_0} \left(\frac{S - S_0}{S_0} \right) \right]^{1/m}$
مدل نمائی	$TF = \frac{1}{B_0} \ln\left(\frac{S}{S_0}\right)$
مدل لگاریتمی	$TF = \frac{1}{B_0} \left(e^{\pm \left(\frac{S-S_0}{S_0}\right)} - 1 \right)$

از مدل های زمانی منتهی به خرابی زمان تخریب برای یک لوله در دمای عملکردی T بدست آمده و با استفاده از لوله های مختلف در

استیل با سیال کار آب را در سه دمای مختلف بمدت دو سال تحت تست دائم قرار دادند. دما های تست آنها ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه فارنهایت بود معیار خرابی لوله ها تولید گاز هیدروژن در لوله های تحت تست بود [۱]. تطابق پذیری و قابلیت اطمینان لوله های حرارتی اولین بار توسط باسیلیوم و پراگر در ۱۹۷۵ مورد بررسی قرار گرفت [۲]. در ۲۰۰۶ طول عمر لوله های حرارتی یا سیال کار آب و در دماهای بالا توسط آندرسن و داسنیجر مطالعه گردید [۳]. در ۲۰۲۲ کیانفر و همکاران طول عمر لوله های حرارتی فضائی با ترکیبی از روش آرنیوس و FIDES مورد بررسی قزاز دادند [۴].

در این تحقیق با استفاده از زیر ساخت ایجاد شده قادریم تا لوله های حرارتی زیادی بطور پیوسته در دماهای معین تست گردند و نتایج آن روزانه جمع آوری و آماده پردازش گردند. جهت محاسبه طول عمر لوله های حرارتی پس از گردآوری داده ها، تخمین زمان منتهی به خرابی بسیار حائز اهمیت است. این امر توسط مدل های زمان منتهی به خرابی صورت می-پذیرد. قابلیت اطمینان به این دلیل اهمیت دارد که برخی ویژگی های مهم تاثیرگذار مواد به مرور زمان و به صورت تدریجی کاهش می-یابند. پس از تخمین طول عمر با استفاده از تست های شتاب و قانون آرنیوس زمان خرابی در دمای مد نظر سیستم استخراج شده و با توجه به در اختیار داشتن چندین لوله حرارتی قابلیت اطمینان و توزیع مناسب عمر لوله های حرارتی محاسبه می-گردد.

تئوری

اگر S نشان دهنده یک ویژگی مهم از یک ماده باشد به طوری که این ویژگی بصورت یکنواخت و تقریباً تدریجی در طول عمر آن با ماده تغییر نماید. بسط تیلور حول سری مک لورن زیر را تولید می-کند.

$$S(t) = S_{t=0} + \left(\frac{\partial S}{\partial t}\right)_{t=0} t + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial t^2}\right)_{t=0} t^2 + \dots \quad (1)$$

در لوله های حرارتی به شور کلی ویژگی S که اختلاف دمای بین کندانسور و اواپراتور در نظر گرفته شده است [۴]. این ویژگی با اختلاف دمای زیر ۲ درجه سانتی گراد آغاز میشود و به مرور با پیر شدن لوله حرارتی افزایش می-یابد. تا آنجا که مقاومت حرارتی را به اندازه ای افزایش داده که عملکرد لوله حرارتی در سیستم قابل قبول نخواهد بود. با فرض این که عبارت با مراتب بالاتر در بسط بالا می-تواند به سادگی با معرفی توان m قانون توان، تقریب زده شود، می-توان بسط بالا را در شکل کوتاه زیر نوشت:

$$S = S_0 [1 + B_0 t^m] \quad (2)$$

که در آن B_0 ضریب و m توان قانون توان است. هردو پارامتر مقادیر قابل تنظیمی هستند که از داده های تخریب ویژگی مشاهده

جمع اوری و پردازش داده ها

دو روش شستشوی نهایی که جوابهای قابل قبولی از لحاظ طول زمان عملکرد داشته است را به اختصار روش A و روش B نامگذاری می‌نماییم. برای مقایسه نتایج این دو روش از هر روش دولوله حرارتی در دمای عملیاتی یکسان شروع به کار کرده اند. لوله ها مستقیم بوده و در محیط خنک می‌گردند.

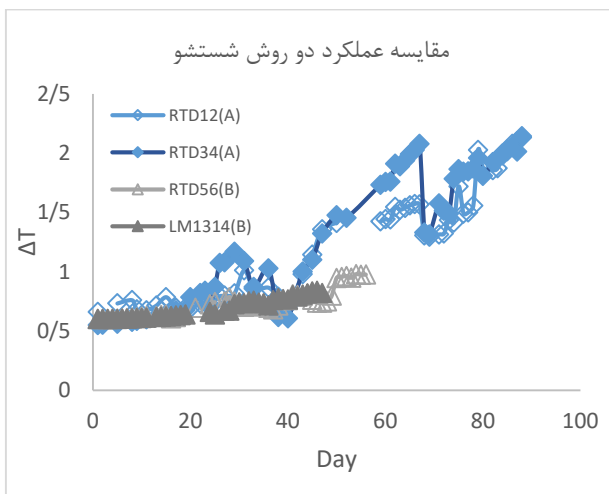
در این چهار لوله زمان منتهی به خرابی با کمک مدل های پیش بین شرح داده شده بدست آمده است. در دو مورد که بصورت عملی زمان منتهی به خرابی بدست آمده، این زمان با زمان های پیش بینی مقایسه شده است که در جدول ۳ ملاحظه می‌گردد.

جدول ۳. مقایسه دومدل پیشبین زمان منتهی به خرابی با نتایج واقعی

	TF _e	TF _p	ΔT ₀	Real TF
RTD12 (A)	101	109	0.65	86
RTD34 (A)	81	82	0.55	88
LM1314 (B)	129	125	0.6	
RTD56 (B)	174	165	0.6	

همانگونه که از نتایج موجود در شکل ۲ مشخص است عملکرد لوله ها در مدل شستشوی B بهبود یافته است.

از منظر دیگر جوابهای لوله ها در دو دمای عملیاتی و در هر دو مدل شستشو نشان از تکرار پذیری روش ساخت دارد. هرچند برای انجام تحلیل بهتر نیازمند زمان بیشتر برای تخریب دو لوله RTD56 و LM1314 خواهیم بود (که این مورد درحال انجام است). اما نتایج مدل های پیش بین نیز در هر دو مورد نشان از یک بازه زمانی حداقلی، حدود ۱۳۰ روزه تا تخریب دارند.



شکل ۲. مقایسه عملکرد دو روش شستشو در طول عمر لوله های حرارتی

دمای عملکردی متفاوت مقادیر (Q) انرژی اکتیواسیون و A₀ تعیین می‌گردند. مقدار K ثابت بولتزمن بوده و روابط (۵و۶) ارتباط زمان خرابی دو لوله در دو دمای عملکردی نشان می‌دهند:

$$TF_1 = A_0 \exp\left(\frac{Q}{KT_1}\right) \quad (5)$$

$$TF_2 = A_0 \exp\left(\frac{Q}{KT_2}\right) \quad (6)$$

که از تلفیق این دو رابطه می‌توان ثابت Q/k را محاسبه نمود:

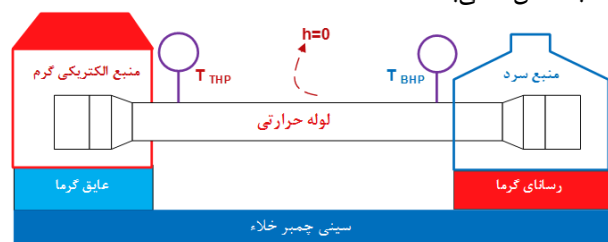
$$\frac{(\ln(TF_1) - \ln(TF_2))}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} = \frac{Q}{k} \quad (7)$$

مواد و دستگاه‌های تقریباً یکسان که در مجموعه یکسان از شرایط تنش قرار می‌گیرند، دقیقاً در زمان یکسانی دچار خرابی نمی‌شوند. توضیح این رویداد این است که تفاوت های جزئی در مراحل ساخت یا ساختار مواد می‌تواند در زمان تخریب مواد و دستگاه های یکسان اختلاف ایجاد نماید. این تفاوت های زمانی، باعث می‌شود که به توزیع زمان منتهی به خرابی نیز توجه شود تا با استفاده از آن محاسبات دقیقتری در تعیین قابلیت اطمینان انجام گیرد. بر اساس تجربه های قبل، دو تابع چگالی احتمال لگ نرمال و وایبول به طور گسترده ای برای توصیف خرابی دستگاه یا مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. انجام این محاسبات توسط نرم افزار MINITAB انجام می‌گیرد.

پس از این محاسبه بسادگی ثابت A₀ بدست آمده و با کمک رابطه ۴ بعنوان مدل منتهی به خرابی، در هر دو زمان منتهی به خرابی المان تعیین می‌گردد [۲].

ساخت و انجام تست

لوله حرارتی مورد استفاده در این آزمایش از نوع شیاردار آلومینیومی با سیال کار استن و از گرید فضایی است. لوله های حرارتی در سه دما تحت تست قرار می‌گیرند. مشکل اصلی در عملکرد لوله ها گازهای غیر قابل کندانس است که بدلیل واکنش های شیمیایی در لوله حرارتی تشکیل شده و عملکرد لوله را بشدت تحت تاثیر قرار می‌دهند. علت افزایش دما نرخ تولید آن افزایش می‌یابد. به همین دلیل لوله های تحت تست در دو دمای بالا (۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی گراد) قرار گرفته اند تا با افزایش نرخ خرابی بتوان مدل خرابی را در زمان کوتاهتری محاسبه و پیش بینی نمود. نحوه قرارگیری لوله های حرارتی در تست مشابه شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱. نحوه قرارگیری سیستم تست لوله حرارتی برای تست طول عمر

جدول ۷. تخمین طول عمر لوله حرارتی در دماهای مختلف

Temp@	TF(Day)
40	609122.5
45	201530.8
50	69000.17
55	24409.04
60	8908.483
65	3349.716
70	1295.976
75	515.2721
80	210.2925

با استفاده از آن زمان عملکرد لوله ها در دمای مد نظر طراحی (بطور

مثال $T=60$ درجه سانتی گراد) محاسبه می شود.

$$AF = \frac{TF_T}{TF_{Stress}} = \exp\left(\frac{Q}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Stress}}\right)\right) \quad ۸$$

برای محاسبه و تخمین مدت عملکرد در دمای طراحی از رابطه ۸ مشخص است که با ضرب مدت زمان عملکرد در شرایط تنش بالا (که در جدول ۴ و جدول ۵ آورده شده است)، در ضریب شتاب مدت زمان عملکرد در دمای طراحی برای هر لوله محاسبه می گردد (جدول ۸). حال با این روش به داده های زیادتاری برای تخمین تابع توزیع لوله های حرارتی در دمای طراحی دسترسی خواهیم داشت. حال با کمک نرم افزار *MINITAB* بهترین تابع توزیع برای این داده ها را استخراج می نمایم (شکل ۳).

جدول ۸. استخراج داده های دما برای لوله ها در دمای مورد نظر طراحی با استفاده از ضریب شتاب

نام لوله	دمای کارکرد	زمان تخریب در دمای کارکرد (TF_{Stress})	زمان تخمین در دمای ۶۰ درجه با استفاده از ضریب شتاب (TF_T)
LM1516	۸۹	۴۸	9587.605
LM12	۸۹	۴۳	8588.897
LM34	۸۹	۴۳	8588.897
TC34	۸۵	۷۵	7592.457
TC56	۸۵	۱۰۱	10224.51

با توجه به نتایج مثبت روش شستشوی B از این مدل لوله های حرارتی چهار لوله حرارتی خم به دوروش تولید گردید. علاوه بر لوله موجود در روش شستشوی B، ۴ لوله دیگر نیز با همین روش آماده گردید. لوله های LM1112 و LM34 و LM1516 در دمای ۸۹ درجه کاری و لوله های حرارتی TC34 و TC56 هر دو در دمای کاری ۸۵ درجه مورد تست قرار گرفته اند (جدول ۴ و جدول ۵).

جدول ۴. زمان تخریب لوله های حرارتی در دمای ۸۹ درجه سانتی گراد

نام لوله	دمای کارکرد	زمان تخریب
LM1516	۸۹	۴۸
LM1112	۸۹	۴۳
LM34	۸۹	۴۳

جدول ۵. زمان تخریب لوله های حرارتی در دمای ۸۵ درجه سانتی گراد

نام لوله	دمای کارکرد	سرعتیترین زمان تخریب
TC34	۸۵	۷۵
TC56	۸۵	۱۰۱

بر اساس نتایج جدول، در دمای ۸۹ درجه سانتی گراد میانگین زمان های منتهی به خرابی سه لوله بعنوان زمان منتهی به خرابی در این دما در نظر گرفته می شود. به همین صورت نیز نتایج جدول زمان منتهی به خرابی لوله در دمای ۸۵ درجه استخراج می گردد. خلاصه این نتایج در جدول آورده شده است.

جدول ۶. خلاصه نتایج میانگین عملکرد زمان منتهی به خرابی لوله های حرارتی خم در دو دمای ۸۹ و ۸۵ درجه سانتی گراد

TF(day)	Temp@	1/T	ln TF
۸۸	85	0.002793	۴,۴۷۷۳۳۶۸
۴۴,۶	89	0.002762	۳,۷۹۷۷۳۳۸

با استفاده از این داده ها انرژی اکتیواسیون حدود 1.89eV محاسبه شده و $\frac{Q}{k} = 22018.46$ و $A_0 = 1.71 \times 10^{-25}$ خواهد بود. با این رابطه می توان در دماهای مختلف زمان عملکرد لوله حرارتی را تخمین زد (جدول ۷).

توزیع در نرم افزار Minitab انتخاب گردید. همانگونه که انتظار میرفت برای قعات مکانیکی توزیع وایوبال و نرمال غالباً قابل قبول هستند. با استفاده از این توزیع قابلیت اطمینان این لوله های حرارتی در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد کار مداوم، ۹۸ درصد برای ۶۰۰۰ روز کاری مداوم است. این روش تحلیل مناسب بوده اما در کارهای آتی با تعداد بیشتری از لوله های حرارتی توزیع ها بواقعیتر نزدیکتری دریافت خواهد شد.

مراجع

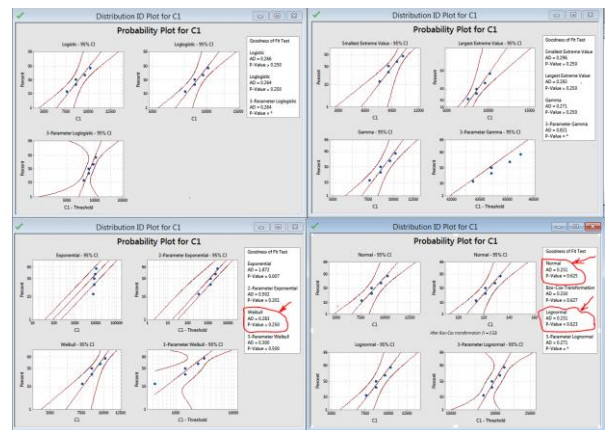
[1] E.Baker, "Prediction of Long-Term Heat Pipe Performance from Accelerated Life", *AIAA Journal*, vol. 11, No. 9, pp. 1345-1347, 1973

[2] A. Basiulis, R.C. Prager, "Compatibility and reliability of heat pipe materials". *AIAA 10th Thermophysics conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Denver, 1975.*

[3] W.G. Anderson, P.M. Dussinger, D. Sarraf, "High temperature water heat pipe life tests", in: *M.S. El-Genk (Ed.), AIP Conference, Vol. 100, American Institute of Physics, p. 813, 2006*

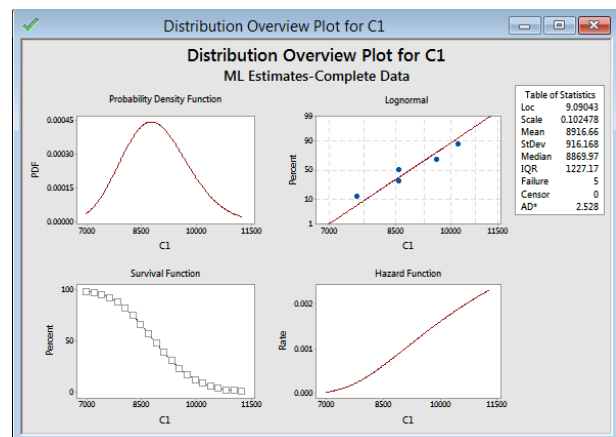
[4] K. Kianfar, Sh. Joodaki, I. Dashti, S. Asgharee, "Lifetime estimation of heat pipes in space applications using particle filtering, Arrhenius and FIDES methods", *Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 22, 2021*

[5] J. W. Mcpherson, "Reliability Physics and Engineering: Time to Failure Modeling", *2nd Edition, Springer, 2010*



شکل ۳. تخمین توزیع های مختلف برای لوله های حرارتی خم در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد

از نتایج شکل مشخص است که توزیع های نرمال، lognormal و Weibull توزیع های مناسبی هستند. با توجه به این نتایج اگر توزیع را بصورت نرمال در نظر بگیریم با استفاده از نرم افزار Minitab، در این دما قابلیت اطمینان محاسبه می شود (شکل ۴). آنچه از شکل برآورد می شود قابلیت اطمینان بالای ۹۸ درصد برای حداقل ۶۰۰۰ روز کاری است.



شکل ۴. محاسبه قابلیت اطمینان لوله ها در دمای طراحی ۶۰ درجه سانتی گراد

نتیجه گیری و جمع بندی

همانگونه که مشهود بود (شکل ۲) از منظر طول عمر لوله های حرارتی با سیال استن، استفاده از روش شستشوی B نتایج بسیار بهتری از روش A داشته است. با این بهبود در طول عمر لوله های حرارتی فضائی با سیال کار استن ۵ عدد لوله حرارتی در دو دمای ۸۹ و ۸۵ درجه سانتی گراد تحت تست مداوم قرار گرفته اند. زمان خرابی آنها توس مدل های پیش بین تخمین زده شده و با داده های واقعی حداکثر ۱۵٪ فاصله داشته است. با در نظر گرفتن میانین زمان خرابی برای هر دما و استفاده از مدل آربینوس ارتباط زمان خرابی هر لوله با دما بدست آمد. با استفاده از این ۵ داده در دمای طراحی ماهواره (۶۰ درجه سانتی گراد) بهترین