The application of statistics and probability in improving asset reliability engineering: a case study of reciprocating compressor maintenance

Navid Nasr[1]
PhD in Industrial Engineering, Tehran, Iran

Morteza Farhadi Sartangi[2] *
Department of Industrial Engineering, Payam Noor University, PO Box 3697-19395, Tehran, Iran

Abstract
One of the principles of reliability engineering is to systematize the prioritization of assets based on conditions and effective components in determining the degree of importance of assets. In this article, an attempt has been made to firstly determine the effective components in the degree of importance and use statistical methods in order to determine the desirability range of the importance classes, while emphasizing the importance of reliability analysis and equipment life information, to show its application in the industry so that maintenance and repair experts can use it in addition to analyzing equipment failure patterns, to make better decisions for equipment maintenance. The main advantage of using analysis based on statistics and probability, such as Weibull analysis, is its ability to provide relatively accurate analysis and damage prediction using a small sample size. This feature helps to determine the solutions by finding the first signs of a malfunction and to avoid incurring the cost of further malfunctions. In this article, the reliability of reciprocating compressor cylinders in one of the petrochemical companies has been estimated using Weibull parameters, the periodicity of preventive repairs has been determined, the order quantity of parts has been predicted, and the function of the cylinders has been predicted after the repairs.

Keywords: Degree of importance, Weibull analysis, reliability, reciprocating compressor, preventive maintenance

[1] n.nasr@aut.ac.ir
[2] Farhadi.sartangi@pnu.ac.ir - https://orcid.org/0000-0002-0241-8123

کاربرد آمار و احتمال در ارتقاء مهندسی قابلیت اطمینان دارایی ها:مطالعــه موردی نگهداری کمپرسور رفت و برگشتی

نوید نصر[1]

دکتری مهندسی صنایع، تهران، ایران

مرتضی فرهادی سرتنگی[2*]

گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵ تهران، ایران

چکیده

یکی از اصول مهندسی قابلیت اطمینان، نظامند نمودن اولویت بندی دارایی ها مبتنی بر شرایط و مولفه های موثر در تعیین درجه اهمیت دارایی ها می باشد. در این مقاله سعی شده است، ابتدا با تعیین مولفه های موثر در درجه اهمیت و استفاده از روش های آماری به منظور تعیین بازه مطلوبیت طبقه های اهمیت و ضمن تاکید بر اهمیت آنالیز قابلیت اطمینان و اطلاعات عمر تجهیز، کاربرد آن در صنعت نشان داده شود تا کارشناسان حوزه نگهداری و تعمیرات بتوانند با استفاده از آن علاوه بر تحلیل الگوهای خرابی تجهیزات، در تصمیم گیری های خود برای نگهداری تجهیزات بهتر عمل نمایند. مزیت اساسی استفاده از آنالیز های مبتنی بر آمار و احتمال نظیر آنالیز ویبول در توانایی آن در فراهم کردن آنالیز و پیش بینی خرابی نسبتا دقیق با استفاده از اندازه نمونه کوچک است. این خاصیت کمک میکند تا راه حل ها با پیدا شدن اولین نشانه های یک خرابی مشخص شده و از تحمیل هزینه خرابی های بیشتر جلوگیری گردد.در این مقاله با استفاده از پارامترهای ویبول قابلیت اطمینان سیلندرهای کمپرسور رفت و برگشتی در یکی از شرکت های پتروشیمی تخمین زده شده، تناوب زمانی تعمیرات پیشگیرانه مشخص شده، مقدار سفارش قطعات پیش بینی شده و همچنین پیش بینی کارکرد سیلندرها بعد از اصلاحات انجام شده، صورت گرفته است.

واژگان کلیدی: درجه اهمیت،آنالیز ویبول، قابلیت اطمینان، کمپرسور رفت و برگشتی، تعمیرات پیشگیرانه

۱-مقدمه

هدف کلیه فعالیت های تعمیراتی ، متودولوژی ها و ابزارها،حصول اطمینان از بهره وری فرایند تولید است.به طور سنتی ، این هدف با بازنگری و جایگزینی سیستم های حیاتی از لحاظ عملیاتی و عملکردی بمنظور تضمین دستیابی به ظرفیت تولید حاصل میشد.کلیه این رویکردها تا حدودی نقایصی را نشان داده اند به طور مثال سیستم های موازی و پشتیبان با ظرفیت مازاد ، سرمایه ایی را به خود اختصاص می دهند که میتواند در فرایند تولید بصورت سود آور تری استفاده شود. امروزه فعالیت های تعمیراتی از شکل یک تعمیر ساده به یک فعالیت پیچیده مدیریتی تغییر شکل داده اند که هدف اصلی آن پیشگیری از خرابی میباشد. ارزیابی قابلیت اطمینان اجزاء، یک اصل بنیادی برای اجرای صحیح و مناسب نگهداری و تعمیرات می باشد. یکی از ضروریات پرداخت به مقوله قابلیت اطمینان، تعیین درجه اهمیت دارایی ها می باشد. به همین منظور در یک صنعت پتروشیمی، با تعیین معیار ها و زیر معیار های موثر در تعیین درجه اهمیت دارایی ها، با بهره مندی از نظرات خبرگان، امتیازات هر یک از زیر معیار ها با استفاده از روش AHP، جمع آوری و سپس به منظور تعیین بازه مطلوبیت درجه اهمیت تجهیزات و دارایی ، با بکارگیری روش دسته بندی تصویری[3]و زیر تکنیک طول ثابت برای طبقات ۶ طبقه با ۵ نقطه برش برای ۱۸۲۹ تجهیز اولویت بندی شده انتخاب گردید که نتایج حاصله با استفاده از نرم افزار SPSS به شرح جدول (۱) و شکل (۱) حاصل گردیده است.

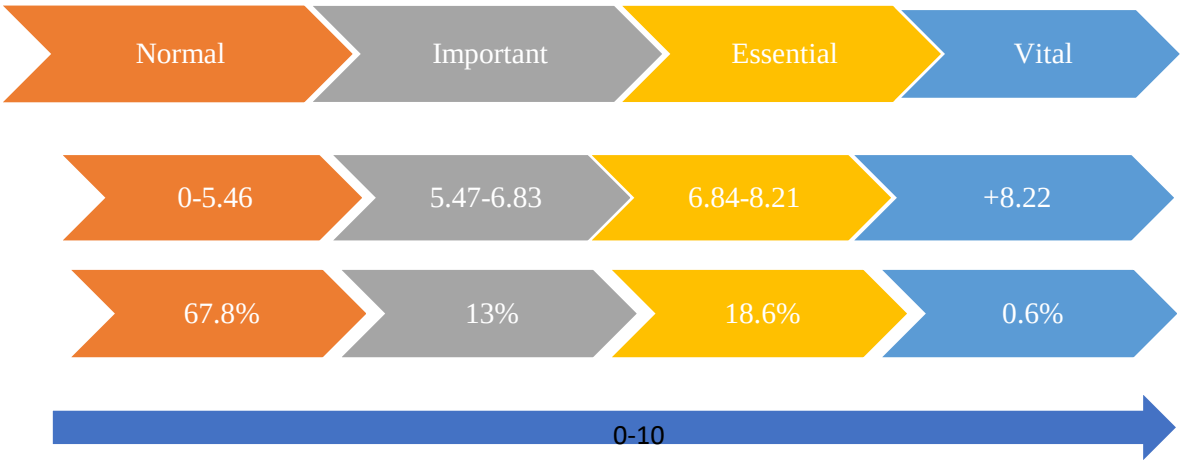
[1] n.nasr@aut.ac.ir

[2] Farhadi.sartangi@pnu.ac.ir - https://orcid.org/ 0000-0002-0241-8123

[3] Visual Binning

جدول (۱). EP (Binned)

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	<= 2.70	110	6.0	6.0	6.0
	2.71 - 4.08	700	38.3	38.3	44.3
	4.09 - 5.46	430	23.5	23.5	67.8
	5.47 - 6.83	238	13.0	13.0	80.8
	6.84 - 8.21	341	18.6	18.6	99.5
	8.22+	10	.5	.5	100.0
	Total	1829	100.0	100.0	



شکل (۱). دسته بندی تصویری

همانگونه که نتایج تحلیل های آماری نشان می دهد، مبتنی بر اصل پارتو، ۸۰٪ توجه ما در نگهداری دارایی ها بر روی ۲۰٪ تجهیزات که در طبقه حیاتی و حساس اولویت بندی شده اند، متمرکز خواهد بود. لذا به همین منظور بالاترین تجهیزی که دارای بیشترین درجه اهمیت می باشد، که یک کمپرسور رفت و برگشتی اصلی می باشد، جهت مطالعه موردی و استفاده از روش های تحلیل آماری، مورد نظر قرار گرفت. روش های موجود ارزیابی قابلیت اطمینان بر پایه آگاهی و اطلاعات در مورد وضعیت اجزاء ماشین است،در حالی که گاهی اوقات این آگاهی و اطلاعات ناشناخته و غیرقطعی است مخصوصا در مراحل اولیه توسعه یک سیستم جدید. در چنین مواردی، یادگیری این مساله که این عدم قطعیت چگونه بر ارزیابی قابلیت اطمینان تاثیر می گذارد، مهم است. قابلیت اطمینان سیستم ها اغلب بستگی به عمر آنان، فاکتورهای ذاتی(ابعاد و اندازه ها ، کیفیت اجزاء ، جنس مواد و ....) و شرایط محیطی نظیر شرایط آب و هوایی، لودکاری و فشار و .... دارد. در این مقاله با استفاده از تابع خرابی ویبول سعی بر آن است تا خرابی های کمپرسور رفت و برگشتی شناسایی و کمی شده، قطعات یدکی مدیریت شده و اقدامات اصلاحی انجام شده ارزیابی گردند.

۲-مرور ادبیات

ارزیابی عمر دارایی (ALA) یک ابزار مهم در درون برنامه های مدیریت دارایی ها به دلیل افزایش عمر استفاده از تجهیزات، می باشد زیرا امروزه هر گونه فعالیت های اضافی مورد انتظار مورد نیاز ، مانند جایگزینی ، تعمیر و یا بازرسی هزینه ر می باشد. و از ابزار های مفید آماری برای انجام مطالعات ALA طرح ویبول است که به راحتی می تواند طول عمر مفید باقی مانده برای هر حالت شکست را در هر تجهیزاتی شناسایی کند (اوسف[1]، ۲۰۲۰). تابع توزیع ویبول که اولین بار توسط ولادی ویبول[2] در سال۱۹۳۷ابداع شد (هالینان[3]، ۲۰۱۸) . و بطور گسترده در آنالیز خرابی و قابلیت اطمینان، هزینه چرخه عمر، انتخاب مواد و کنترل فرایند تولید استفاده شده است (سیمپسون[4]، ۱۹۹۴). میگوئل آفونسو و همکاران طی مقاله ای که در سال ۲۰۲۰، منتشر گردید به آنالیز سیاست های نگهداری با شبیه سازی تولید منعطف سلولی، به استفاده از آنالیز تابع ویبول در ارزیابی خرابی های دوره عمر تجهیزات مکانیکی پرداختند (سلیتو[5]، ۲۰۲۰). تعویض ابزار های و ماشین آلات به عنوان یک راهبرد رایج درتعمیر و نگهداری رایج در هنگام وقوع خرابی های شناخته شده است و از طریق تعیین و مشخصه آن است. زمان مربوط به خرابی (TTF)، اغلب با تابع ویبول مدل‌سازی می‌شوند (ساگربوسا و همکاران[6]، ۲۰۲۰). همانطور که سیستم های مهندسی روز به روز پیچیده تر می شوند، اهمیت تخمین قابلیت اطمینان و تحلیل خرابی ها اهمیت پیدا می کند (هو و همکاران[7]، ۲۰۲۱). آنالیز ویبول تکنیکی است که در آن دیتاهای آماری آنالیز می شوند.این نوع آنالیز این اجازه را به ما می دهد تا رفتار خرابی اجزای یک ماشین پیچیده را درک و تحلیل کنیم. آنالیز ویبول در مورد مسائل زیر می تواند کارساز و مفید باشد.

۱-پیش بینی و تخمین دیتای خرابی

۲-برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات و استراتژی های تعویض با هزینه بهینه

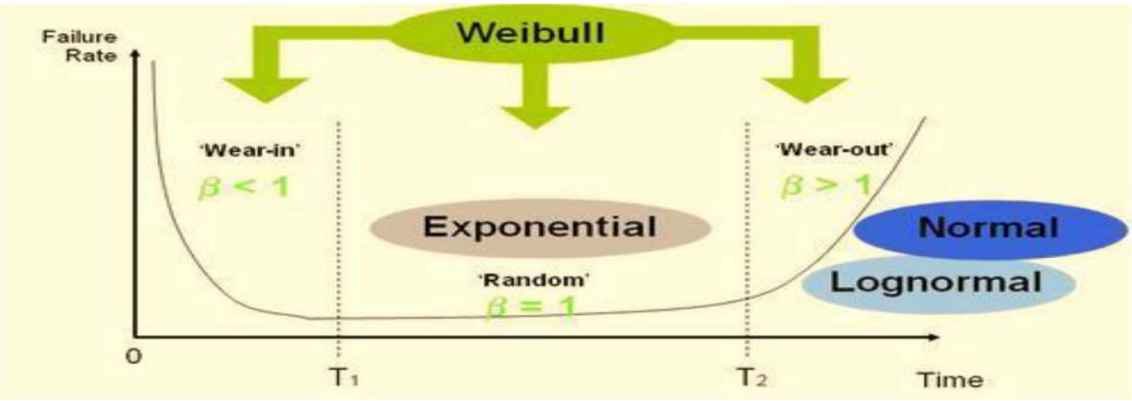
۳-ارزیابی برنامه ها و اقدامات اصلاحی

۴-پیش بینی قطعات یدکی

تابع توزیع ویبول یا تابع چگالی احتمال ویبول دارای دو پارامتر است

الف. پارمتر شکل :(β)که معرف شکل توزیع است ب. پارامتر مقیاس(η) :که معرفگستردگی توزیع است

تابع ویبول به شکل دو و سه پارمتری استفاده میشود که پارمتر سوم که به آن پارمتر مکان گفت می‌شود میتواند صفردر نظرگرفته شود در واقع پارامترهای مهم همان شکل و مقیاس هستند که مقادیر آنها به درک ما از الگوی خرابی کمک میکند و میتواند به این سوال پاسخ دهد آیا خرابی در مرحله اولیه ،تصادفی و یا فرسودگی است.



شکل(۲). Bathtub Curve

[1] Oussef
[2] Waloddi Weibull
[3] Hallinan
[4] Simpson
[5] Sellitto
[6] Sgrbossa
[7] Hu

پارامتر شکل(β) همچنین به نام شیب نیز معرفی میگردد که در واقع برابر با شیب خط رگرسیون نمودار احتمال می باشد. مقادیر متفاوت پارامتر شکل، می تواند اثر قابل توجهی بر رفتارتوزیع احتمال داشته باشد. در واقع، برخی از مقادیر پارامترشکل باعث میشوند که معادله تابع توزیع به سایر توابع دیگر کاهش یابد به عنوان مثال اگر:

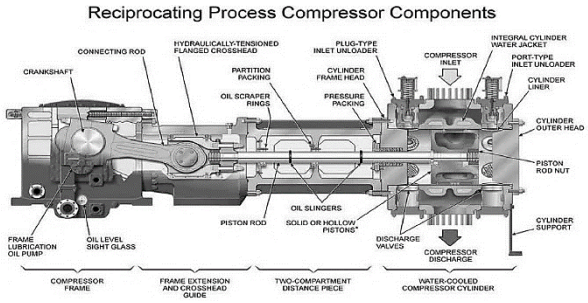
- $\beta = 1$ است آنگاه نرخ خرابی ثابت است که همچنین به عنوان عمر مفید یا خرابی های تصادفی شناخته میشود.
- $\beta > 1$ است آنگاهنرخ خرابی با گذشت زمان در حال افزایش است که همچنین به عنوان خرابی های مرتبط با فرسودگی یا عمر شناخته می‌شود.
- $\beta < 1$ است آنگاه نرخ خرابی با گذشت زمان در حال کاهش است که همچنین به عنوان خرابی های دوران آب بندی یا خرابی های ابتدای عمر شناخته می‌شود.

لذا با توجه به محبوبیت تابع ویبول دو متغیره درآنالیز ویبول، فرمول به صورت دو رابطه (۱) و رابطه (۲) می‌باشد:

$$R(v) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \qquad (۱)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t^{\beta-1}}{\eta}\right) \qquad (۲)$$

در جایی که رابطه (۱)، قابلیت اطمینان در تابع ویبول و رابطه (۲) نرخ خرابی در این تابع است. لذا شرکت مورد مطالعه که یکی از شرکت های مطرح پتروشیمی و تولید کننده پلیمر درکشور و خاورمیانه است جهت افزایش فشار گاز از کمپرسورهای رفت و برگشتی استفاده می‌شود.کمپرسورهای رفت و برگشتی تجهیزات کلیدی در صنایع تولیدی فرایندی مانند پالایش نفت، پلنت های شیمیائی و غیره هستند. کمپرسورهای رفت و برگشتی شامل سه جزء اصلی هستند که شامل مکانیزم متحرک شامل(Crankshaft،Bearing،Connecting Rods،Crosshead، Pulley or Coupling(و همچنین مکانیزم کار شامل (Cylinder،Piston، Valves(و بدنه می‌باشند. در شکل (۳) اجزای اصلی یک سیلندر کمپرسور رفت و برگشتی نشان داده شده‌است.



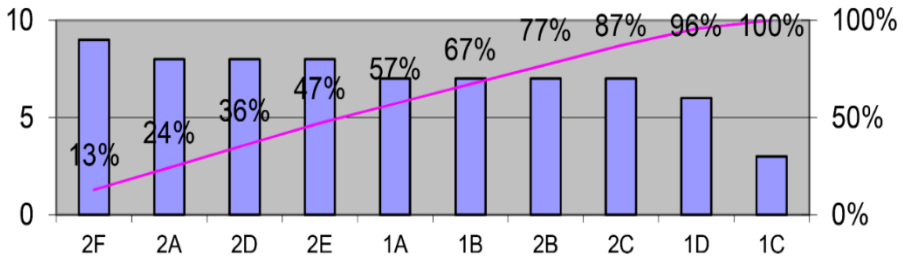
شکل(۳). نمایی از یک سیلندر در کمپرسور رفت و برگشتی

همچنین این کمپرسورها مجهز به سیستم های جانبی روانکاری ، خنک کاری و کنترلی هستند.در چنین سیستمی، با استفاده از تزریق حجم ثابتی از گاز به محفظه سیلندر در یک سری ازمراحل پیوسته عمل افزایش فشار گازصورت می‌گیرد. این نوع کمپرسورها اجازه نمیدهند که گاز از خروجی سیلندر به ورودی سیلندر راه پیدا کند مگر به علت نشتی بین کلیرینس اجزاء متحرک که در این حالت مقداری جریان برگشتی بوجود خواهد آمد.کمپرسورهای هیدروکربنی API 618 معمولا به صورت افقی با جفت سیلندرهای مخالف یکدیگر طراحی میگردند تا منطبق با الزامات تعادل مکانیکی و آب بندی گاز باشند. سیلندرها یکی از مهمترین اجزای کمپرسورهای رفت و برگشتی هستند که در برخی طراحی ها به صورت ثابت به بدنه کمپرسور متصل هستند و در برخی دیگر قابل جابه جایی هستند.

۳-روش تحقیق

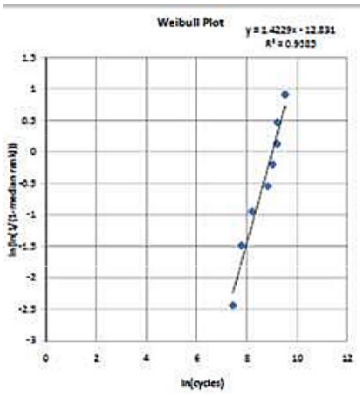
در شرکت پتروشیمی مورد تحقیق کمپرسور رفت و برگشتی با۱۰سیلندر وجود داردکه خرابی هرکدام از سیلندرها به منجر به توقف تجهیز و متعاقبا از سرویس خارج شدن واحد تولیدی میگردد. هرکدام از سیلندرهای کمپرسور بر اساس مرحله ایی که در آن قرار دارند به صورت خاص نامگذاری شده اند به نحوی که سیلندرهای مرحله اول به صورت 1A,1B,1C,1D نامگذاری و سیلندرهای مرحله دوم به صورت 2A,2B,2C,2D,2E,2F نامگذاری شده‌اند. در ابتدا اطلاعاتی که برای آنالیز قابلیت اطمینان حیاتی هستند مانند ساعت و تاریخ خرابی هرکدام از سیلندرها، ساعت و تاریخ شروع و پایان تعمیر، ساعت و تاریخ روشن شدن مجدد کمپرسور، حالت و علت خرابی

ها، نفر ساعت صرف شده برای تعمیر و قطعات مصرف شده جمع آوری گردید. زمان تا خرابی سیلندرهای مختلف از۳۴۳تا۲۴۰۰۰ساعت متغیر بوده و در نهایت تعداد۷۰نمونه جمع آوری گردید.در آنالیز قابلیت اطمینان،زمان تا خرابی، زمانی است که یک تجهیز یا قطعه کار میکند تا شکست یا خرابی رخ دهد که در واقع همان عمر تجهیز یا قطعه است. در خصوص کمپرسور رفت و برگشتی مورد مطالعه، زمانی است که یک سیلندرکارمیکند تا خرابی رخ دهد که ممکن است کمپرسور به دلیل خرابی هرکدام از۱۰سیلندر از سرویس خارج گردد. به عنوان مثال در کل، تعداد۹توقف کمپرسور به علت خرابی سیلندر شماره۸،2F توقف به علت خرابی سیلندر2Eو۷ توقف به علت خرابی سیلندر1A بوده است. همچنین مشاهده شد که زمان تا خرابی برای سیلندر 1B،۲۴۱۲۷ساعت بوده در حالی که این مقدار برای سیلندر 2E فقط۳۴۳ ساعت بوده است. این نشان میدهد که رفتار خرابی تصادفی بوده است. در قدم اول نیاز است تا تناوب خرابی برای هر سیلندر با استفاده از نمودار پارتو نشان داده شود. نمودار پارتو یا نمودار۲۰-۸۰ نشان میدهد که۸۰درصد خرابی ها به علت۲۰درصد دلایل هستند که در واقع نشان میدهد که کدام سیلندرها سهم بیشتری در توقف کمپرسور داشته اند.



شکل (۴). نمودار پارتو تناوب خرابی هر سیلندر

طبق شکل(۴) و اصل پارتو حدود۴۷درصد از توقفات کمپرسور فقط به خاطر خرابی۴ سیلندر2D , 2A , 2Fو2E بوده است.توزیع ویبول به طور گسترده برای آنالیز قابلیت اطمینان و عمر استفاده میشود و از آنجایی که خرابی تصادفی بوده و نرخ خرابی ثابت نیست لذا توزیع ویبول بهترین انتخاب جهت آنالیز وضعیت کمپرسور است. با استفاده از زمان های تا خرابی هریک از سیلندرها و نرم افزارهای آماری ، مقادیر پارامترها شکل و مقیاس توزیع ویبول تخمین زده شد. بطور مثال جهت سیلندر2F خط رگرسیون کشیده شده و مقدارR^2 نشان دهنده این است که تابع ویبول به خوبی میتواند رفتار خرابی را نشان دهد زیرا هرچقدر مقدار $R^2 = 0.95$ به عدد یک نزدیک تر باشد تابع ویبول تابع مناسب تری برای تحلیل رفتار خرابی است.



شکل (۵). خط رگرسیون سیلندر2F

همانگونه که در جدول(۲) مشاهده می‌شود مقادیرپارامترهای سیلندرهای مورد نظر و مقدارR^2 آنها نشان داده شده‌است.

جدول(۲). پارامتر هر سیلندر و مقادیر R^2

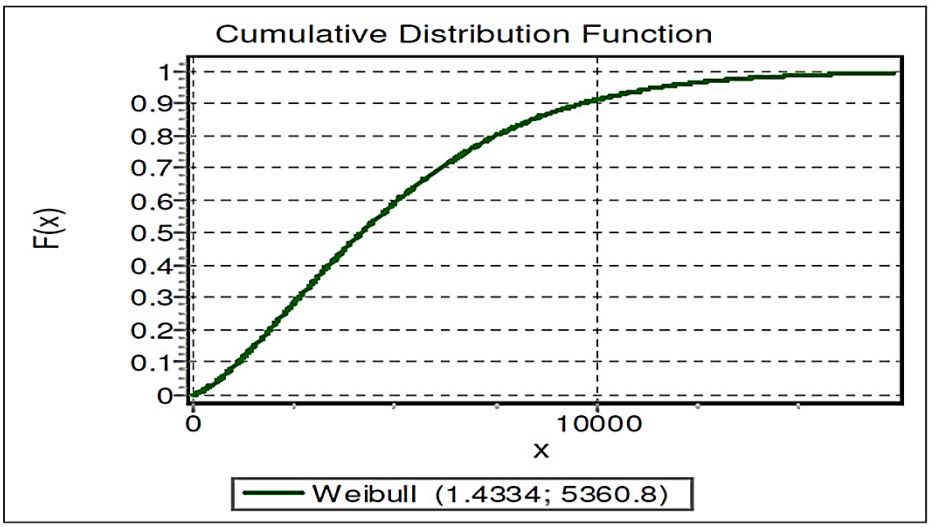
Cylinder NO	Shape Parameter	Scale Parameter	Coefficient
2A	1.4	6579	0.96
2D	1.2	7357	0.95
2F	1.4	5360	0.96
2E	0.8	4837	0.93

همچنین با استفاده از فرمول های زیر و با استفاده از پارامترهای محاسبه شده مقیاس و شکل هر سیلندر امکان محاسبه زمان تا خرابی هر سیلندر و قابلیت اطمینان آن در آن زمان نیز قابل محاسبه می‌باشد (کوروارتو و همکاران[1]، ۲۰۱۷).

$$Expected\ to\ time\ failure = E(t) = \gamma + \eta * \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (۳)$$

$$Reliability(Weibull) = R(v) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (۴)$$

به طور مثال با استفاده از فرمول زمان تا خرابی و قراردادن پارامتر مکانYبرابر با صفر میتوان زمان تا خرابی را برای سیلندر 2F،۴۸۸۰ساعت تخمین زد و با قراردادن همین اعداد در فرمول دوم ، قابلیت اطمینان در این ساعت مقدار۴۱درصد بدست می آید همچنین با استخراج نمودارCDF یا تابع توزیع تجمعی این مقادیر از روی این نمودار نیز قابل استخراج می‌باشد.



شکل(۶) . نمودارCDF سیلندر۲F

از آنجایی که پارامتر شکل یا همان β برای سیلندرهای2A و2F و2D بالاتر از ۱است پس خرابی های این سیلندرها ناشی ازفرسودگی است که با بررسی کارشناسان واحد مکانیک و برگزاری جلساتRCFA مشخص شد که با تعویض نوع سیلینگ المنت های سیلندرها امکان افزایش ساعت کارکرد و عمر سیلندرها امکان پذیر می‌باشد. نگهداری پیشگیرانه گاها به عنوان تعویض دوره ایی اجزای یک سیستم

[1] Corvarto

تعریف می گردد (فام[1]، ۲۰۰۶؛ بوس و همکاران[2]، ۲۰۱۳). این تکنیک مفید و اثربخش است برای اجزایی از سیستم که رفتار خرابی آنها مرتبط با عمر و زمان قطعات می‌باشند. از طرفی دیگر ، تعویض پیشگیرانه متوالی می تواند برای سازمان هزینه بر باشد. لذا می‌توان از یک روش تعویض پیشگیرانه زمانبندی شده بهینه استفاده کرد. طبق مدل بارلو و هانتر[3] ،۲مدل ریاضی برای تخمین زمان تعویض قطعات وجود دارد که در عین حال هزینه تعمیرات و نگهداری را نیز به حداقل ممکن میرساند. آنها مدل اول خود را بر این اساس مطرح کردند که تعویض پیشگیرانه بعد ازTساعت کارکرد بی وقفه تجهیز بدون وقوع خرابی انجام میشود.در این مدل اگر تجهیز قبل ازTساعت خراب شود آنگاه می بایستی تعویض پیشگیرانه در زمان وقوع خرابی انجام گردد و تعویض پیشگیرانه بعدی بر اساس این زمانT برنامه ریزی میگردد. در این مدل آنها فرض میکنند که تجهیز بعد از انجام تعویض پیشگیرانه به خوبی یک تجهیز نو میباشد. آنها مدل دوم خود را اینگونه مطرح کردند که تعویض پیشگیرانه بعد ازT ساعت کلی و صرف نظر و بدون توجه به اختلال خرابی ها انجام می‌گردد.

در این مدل آنها فرض میکنند که بعد از تعویض یک قطعه از تجهیز، تجهیز به واسطه خرابی سایر قطعات هنوز مستعد خرابی های بعدی و توقف میباشد.در شرکت پتروشیمی مورد مطالعه کمپرسور فشار بالایی از نوع رفت و برگشتی با۱۰سیلندر وجود دارد خرابی هرکدام از سیلندرها موجب توقف کمپرسورو نهایتا توقف خط تولید میشود.

طبق مدل دوم بارلو و هانتر پس از تعویض پیشگیرانه یک سیلندر، کمپرسور هنوز مستعد توقف به واسطه خرابی سایر سیلندرها می باشد. سیلندرهای کمپرسور رفت و برگشتی در این مدل شامل ۸ عدد کپ فشار بالا است که در کنار هم مجموعه سیلندر را تشکیل می دهندو در برخی مواقع تنش روی این کپ ها باعث ایجاد ترک در کپ ها و نهایتا توقف کمپرسور خواهند شد.وقتی یک کپ در سیلندر دچار ترک و شکستگی می شود ترجیحا کلیه کپ ها تعویض می گردند که طبق مدل اول سیلندر مانند سیلندر نو است و مستعد خرابی نیست. از طرفی دیگر در سایر مدل های کمپرسورها که سیلندرها قابل تعمیر هستند مدل اول کاربرد ندارد زیرا پس از تعمیر،سیلندر هنوز مستعد خرابی است.بر اساس مدل اول نرخ هزینه) هزینه تعویض اصلاحی تقسیم بر هزینه تعویض پیشگیرانه (و پارامترهای ویبول برای هر سیلندر باید محاسبه شود. با استفاده از اطلاعات بدست آمده از واحد تدارکات و انبار و واحد مکانیک هزینه تعویض پیشگیرانه یک سیلندر معادل ۸۰ هزار دلار در حالی که تعویض اصلاحی آن به دلیل شکستگی کپ های داخلی هزینه ایی معادل۳۳۰هزار دلار دارد.طبق جدول شماره۲پارامترهای محاسبه شدند. طبق مدل بارلو و هانتر، طبق نرخ هزینه و پارمترهای ویبول پارامترT_s^* از جداول استاندارد قابل استخراج هستند که در شکل زیر نمونه ای از این جدول استاندارد آورده شده است.

جدول(۳). مقادیر پارامتر سیلندرها

Cylinder	Shape Parameter	Characteristic
2F	5.38	9697
2D	2.84	11795
2A	3.78	12553

[1] Pham
[2] Bose
[3] Barlow and Hunter

β = 4.5		θ =10	MTTF = 9.1257			C_p=1
cost ratio ρ	standard optimal PM interval T_s^*	standard MTBR	cycle reliability $R(T_s^*)$	% of cost reduction by PM (x100)	avg. cost by CM $Z(T\to\infty)$ (C_p/t. unit)	avg. cost by PM $Z(T_s^*)$ (C_p/t.unit)
2	7.616	7.2402	0.7456	0.2094	0.2192	0.1733
4	5.9399	5.8390	0.9085	0.5020	0.4383	0.2183
6	5.2992	5.2447	0.9442	0.6291	0.6575	0.2439
8	4.9163	4.8801	0.9599	0.7006	0.8766	0.2625
10	4.6466	4.6200	0.9687	0.7469	1.0958	0.2774
12	4.4444	4.4235	0.9743	0.7795	1.3150	0.2899
14	4.2845	4.2674	0.9782	0.8039	1.5341	0.3008
16	4.1465	4.1322	0.9811	0.8229	1.7533	0.3104
18	4.0355	4.0232	0.9833	0.8382	1.9724	0.3192
20	3.9360	3.9253	0.9851	0.8507	2.1916	0.3271

β = 5.5		θ =10	MTTF = 9.2320			C_p=1
cost ratio ρ	standard optimal PM cycle T_s^*	standard MTBR	cycle reliability $R(T_s^*)$	% of cost reduction by PM (x100)	avg. cost by CM $Z(T\to\infty)$ (C_p/t. unit)	avg. cost by PM $Z(T_s^*)$ (C_p/t.unit)
2	7.6311	7.3812	0.7977	0.2481	0.2166	0.1629
4	6.2332	6.1634	0.9284	0.5451	0.4333	0.1971
6	5.6815	5.6430	0.9564	0.6678	0.6499	0.2159
8	5.3423	5.3164	0.9687	0.7354	0.8666	0.2293
10	5.1045	5.0852	0.9755	0.7785	1.0832	0.2399
12	4.9202	4.9050	0.9800	0.8086	1.2998	0.2488
14	4.7732	4.7607	0.9830	0.8309	1.5165	0.2564
16	4.6530	4.6424	0.9852	0.8482	1.7331	0.2631
18	4.5452	4.5361	0.9870	0.8620	1.9497	0.2691
20	4.4531	4.4451	0.9884	0.8732	2.1664	0.2746

شکل(۷). جداول استاندارد

متغیر دیگر مورد نیاز برای محاسبات T^* (یا همانPM Interval) است که از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$T_0^* = T_s^* * \frac{\theta_0}{\theta_s} \qquad (۵)$$

در واقع:

$$T^* = T_s^* * Characteristic\ life * \frac{1}{\theta} \qquad (۶)$$

متغیرهای T_s^*وΘ از روی جدول قابل استخراج هستندو نتایج به دست آمده در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۴). محاسبه مقادیر*Ts

Cylinder	Shape Parameter	Cost Ratio	T_s^*	$Characteristic\ life$	T^*
2F	5.38	4.12	6.23	9697	6041
2D	2.84	4.12	5.42	11795	6393
2A	3.78	4.12	5.64	12553	7080

طبق محاسبات پیشنهاد میگردد که سیلندر2F بعد از ۶۰۴۱ ساعت بطور پیشگیرانه با یک سیلندر نو تعویض گردد. همچنین طبق این روش شما قادر خواهید بود که هزینه تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی را مقایسه کرده و احتمال خرابی قبل از تعویض پیشگیرانه را نیز محاسبه نمایید. همانگونه که در جدول زیر آورده شده است.

جدول(۵). جدول نهایی محاسبات

Cylinder	Shape Parameter	Avg Cost by PM	Avg Cost by Corrective	Preventive replacement Cost	PM Strategy Cost	CM Strategy Cost	Cycle Reliability
2F	5.38	0.1971	0.4333	$80000	$15768	$34664	92%
2D	2.84	0.2764	0.4479	$80000	$22112	$35832	84%
2A	3.78	0.2516	0.4413	$80000	$20128	$35304	89%

اگر سیلندر2F به صورت پیشگیرانه تعویض شود هزینه آن۱۵۷۶۸دلار و اگر به صورت اصلاحی و در اثر شکست کپ ها تعویض گردد، هزینه آن۳۴۶۶۴ دلار خواهد بود و احتمال اینکه این سیلندر قبل از اینکه بصورت پیشگیرانه تعویض شود ،خراب نشود۹۲درصد است. طبق محاسبات بالا سیلندر2F میتوانست بعد از ۶۰۴۱ ساعت تعویض گردد ولی سوال این است که چند تعویض در یک بازه زمانی مورد نظر میتواند اتفاق بیفتد که این تخمین جهت برنامه ریزی توقفات و برنامه ریزی تولید می‌تواند بسیار مفید باشد. برای محاسبه تعداد تعویض در یک بازه زمانی (در اینجا بازه یکساله مدنظر قرار گرفته است) از رابطه زیر میتوان استفاده نمود.

$$N = \frac{t}{T} = \frac{1}{2}(K^2 - 1) + K(\sqrt{\frac{t}{T}}\phi^{-1}(\rho) \qquad (۷)$$

در معادله بالا t افق زمانی برنامه ریزی است است که در اینجا یکسال یا ۸۷۶۰ ساعت در نظر گرفته شده است.T متوسط عمر یک سیلندر است. برای افق های زمانی زیاد مانند یک سال با توجه به تئوری حد مرکزی ،Nبصورت نرمال توزیع می یابد و $\Phi^{-1}(P)$ در واقع معکوس تابع توزیع نرمال استو برابر با ۱,۶۵ در این معادله$K=1/\beta$ است که β همان پارامتر شکل ویبول است و محاسبات طبق جدول زیر است:

جدول (۶). جدول محاسبات

Cylinder	Shape Parameter	T=Average Life time	t	$\frac{t}{T}$	$\frac{1}{2}(\frac{1}{\beta^2} - 1)$	$\frac{1}{\beta}((\sqrt{\frac{t}{T}})\phi - 1(\rho))$	Results
2F	5.38	6041	8760	1.5	-0.5	0.4	1.3
2D	2.84	6393	8760	1.4	-0.4	0.7	1.6
2A	3.78	7080	8760	1.2	-0.5	0.5	1.3

لذا محاسبات تخمین میزند که تعداد تعویضات مورد نیاز در یک سال برای سیلندر2F برابر با۱,۳~۱(یک عدد) می باشد. دیگر کاربرد تابع ویبول در توسعه یک سیاست سفارش و کنترل موجودی مناسب و منطبق با سرمایه گذاری و قابلیت اطمینان سیستم ها است به نحوی که ریسک کمبود قطعات و موجودی به حداقل ممکن برسد. لذا در این بخش ما به حل این موضع پرداختیم که برای کمپرسور رفت و برگشتی مورد نظر چه تعداد سیلندر باید خریداری و در انبار نگهداری گردد. دو فاکتور بحرانی بودن و هزینه، برروی تصمیم گیری در خصوص زمان و مقدار سفارش گذاری تاثیر میگذارند.هزینه مرتبط با هزینه سفارش به سه بخش زیاد، متوسط و کم تقسم می‌شود. بحرانی بودن نیز بر اساس هزینه عدم کارکرد صحیح فرآیند و یا عدم انجام وظیفه عملکردی تجهیز تعریف میگردد. بحرانی بودن نیز میتواند به سه بخش زیاد، متوسط و کم تقسیم گرددکه در واقع ما میتوانیم ماتریس هزینه-بحرانیت را به صورت زیر تدوین کنیم.

CRITICALITY / COST	LOW	MODERATE	HIGH
LOW	LL	LM	LH
MODERATE	ML	MM	MH
HIGH	HL	HM	HH

شکل(۸). ماتریس هزینه-بحرانیت

طبق ماترس هزینه-بحرانیت سه نوع استراتژی مختلف سفارش گذاری وجود دارد (بارلو و هانتر[1]، ۱۹۵۹). استراتژی اول برای قطعاتی که بر اساس HM,HH , MH طبقه بندی می‌شوند که سطوح اولیه موجودی می‌تواند طبق فرمول زیر برای این دسته از قطعات محاسبه شود:

$$N = \frac{t}{T} = \frac{1}{2}(K^2 - 1) + K(\sqrt{\frac{t}{T}\phi^{-1}(\rho)} = \frac{t}{T} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\beta^2} - 1\right) + \frac{1}{\beta}(\sqrt{\frac{t}{T}\phi^{-1}(\rho)} \qquad (۸)$$

$$t_c^* \geq [\overline{T_C} + 3\sigma_C + (Manufacturer\ s\ Lead\ Time + Shipment\ Time]$$

که بسته به ضریب واریانس ، پارامترK و یکپارچگی مقادیر بالایP دارد.به عنوان یک فاکتور اضافه ایمنی ، تعداد قطعاتی که توسط این رابطه محاسبه میگردد، در هنگام سفارش گذاری ، میتواند بعلاوه عدد یک شود. استراتژی دوم برای قطعاتی که بر اساس ML,MM HL طبقه بندی میشوندکه فرمول مرتبط با این نوع استراتژی همان نقطه سفارش بهینه است.

$$Q^* = \sqrt{\frac{2\bar{D}C_0}{C_h}} \qquad (۹)$$

که در این فرمولD برابر با متوسط تقاضا سالیانه ،C_0 برابر با هزینه هر سفارش و C_h هزینه نگهداری و انبارداری سالیانه به ازاء متوسط موجودی است. استراتژی سوم برای قطعاتی که بر اساس LL, LM , LH طبقه بندی میشوند که خارج از بحث این نوشته هستند.چون سیلندرهای کمپرسور رفت و برگشتی به عنوان هزینه بالا و بحرانیت بالا طبقه بندی میشوند لذا از استراتژی اول برای تعیین تعداد موجودی و خرید استفاده میشود.

تفاضای سالیانه برای فرایند:۳۴۰۰۰۰تن/سال

ظرفیت تولید فرایند :۳۰۰۰۰۰تن/سال

P=340000/300000=1.13

لید تایم=۶ماه

زمان مورد نیاز برای حمل=۱۲ماه

زمان مورد نیاز برای حمل + لید تایم =۱۸ماه =۱,۵سال

جدول(۷). محاسبهMTTF

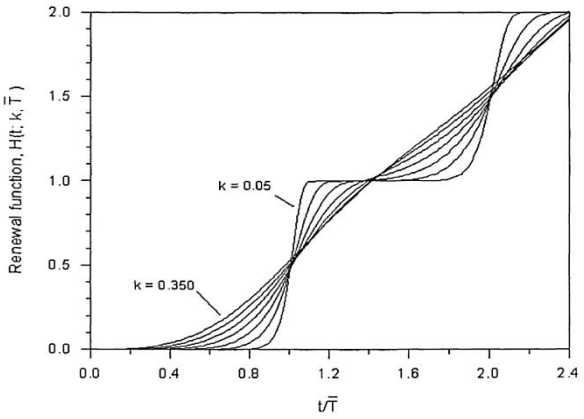
Cylinder	Characteristic Life	Shape Parameter	$\Gamma(1+\frac{1}{\beta})$	MTTF=T
2F	9697.00	5.38	0.92	8941.05
2D	11795.00	2.84	0.89	10508.63
2A	3.7812553.00	3.78	0.90	11341.91

جدول(۸). جدول محاسبات

Cylinder	Characteristic Life	Shape Parameter	T_C	$3\sigma_C$	t^*	$K = \frac{1}{\beta}$
2F	9697.00	5.38	0.3	0.90	1.82	0.19
2D	11795.00	2.84	0.3	0.10	1.85	0.35
2A	3.7812553.00	3.78	0.3	0.11	1.86	0.26

[1] Barlow and Hunter

طبق پارامترهای محاسبه شده در جدول (۸) و مقدارK طبق شکل (۹) در زیر



شکل(۹). نمودار*t وK

مشخص می‌شود که برای سیلندر 2F که پارامتر $t^*=t/T=1.82$ و با پارامتر K= .19 تقریبا ۱٫۴~۱ تعداد سیلندر نیاز است لذا سیاست سفارش گذاری می‌تواند سفارش گذاری اولیه۱+۱=۲باشد که در هنگام خرابی سیلندر می‌تواند یک سیلندر دیگر سفارش گذاری شود. همانگونه که در ابتدای نوشته توضیح داده شدبا بررسی های انجام شده، تیم فنی به این نتیجه رسید با تغییر نوع سیلینگ المنت های سیلندرها امکان افزایش ساعت کارکرد و قابلیت اطمینان سیلندرها وجود دارد اما سوالی که اینجا مطرح می‌شود این است که آیا روشی برای پیش بینی رفتار سیلندرها با سیلینگ المنت های جدید وجود دارد و آیا قابلیت اطمینان با این تغییر افزایش پیدا خواهد کرد یا خیر. کاربرد دیگر تابع ویبول در استفاده از شبیه سازی مونت کارلو است (اینال[1]، ۲۰۰۵) که در این شبیه سازی با استفاده از اعداد تصادفی و تابع توزیع خرابی، زمان تا خرابی تصادفی تولید میشود. در نرم افزار اکسل با استفاده از تابع RAND() میتوان اعداد تصادفی بین صفر و یک تولید کرد. فرمول شبیه سازی مونت کارلو برای توزیع ویبول به قرار زیر میباشد (سینگ و میترا[2]، ۲۰۰۶).

$$\alpha\{-LN(1-RAND()\}^{\wedge\frac{1}{\beta}} \qquad (۱۰)$$
$$\alpha = Scale\ Parameter,$$
$$\beta = Shape\ Parameter$$

در کمپرسور مورد مطالعه سیلندرها بصورت سری هستند و خرابی هریک از سیلندرها منجر به توقف کمپرسور خواهد شد. در این روشT0 به عنوان زمان ماموریت در نظر گرفته میشود که در واقع برابر زمانی است که انتظار میرود تا کمپرسور کار کند. زمان های T2AوT2D به عنوان مثال، زمان های شبیه سازی شده سیلندرهای 2Dو2A هستند. دو پارامترβوα پارامترهای توزیع ویبول هستند که پس از تغییر سیلینگ المنت ها و بر اساس ساعت کارکرد جدید سیلندرها بدست آمده است. ماموریت زمانی موفقیت آمیز است کهT2D وT2A هر دو بزرگتر از T0 باشند یعنی در واقع هیچکدام از این دو سیلندر تا قبل از زمان ماموریت خراب نشوند. در این مورد قابلیت اطمینان با استفاده از تولید۱۰۰عددتصادفی شبیه سازی شد که هرچه تعداد اعداد تولید شده بیشتر باشد، تخمین زده شده دقیق تر خواهد بود. طبق جدو(۹):

جدول(۹). محاسبات مونت کارلو

T2D	T2A	T0	Probability	Confidence	Deviation
7900.161	7222.012	10000	27.27%	0.088175512	0.447628
1556.477	13940.59	10000			
10671.05	7523.018	10000			
9464.302	13953.42	10000			
8766.058	8332.709	10000			

[1] Innal
[2] Singh and Mitra

پس از ۱۰۰شبیه سازی، احتمال کارکردن هر دو سیلندر بعد از ۱۰۰۰۰ساعت (زمان ماموریت) ۲۷درصد با انحراف۴۴. است که هرچقدر انحراف کمتر باشد تخمین و نتایج بدست آمده بهتر است. مشخص است که سیلندرهای 2A2D پس از تعویض سیلینگ المنت ها بیشتر کار خواهند کرد و توقف کمپرسور کمتر خواهد شد زیرا میانگین ساعت کارکرد تا قبل از تغییر سیلینگ المنت ها بین ۶۰۰۰تا۷۰۰۰ساعت بود.

۴-خلاصه و نتایج

استفاده از آنالیز عمر و قابلیت اطمینان تجهیزات با استفاده از تابع ویبول برای شناسایی الگوی خرابی تجهیزات و قطعات و همچنین طراحی استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات بسیار مفید بوده و با استفاده از این آنالیز،کارشناسان حوزه نگهداری و تعمیرات قادر خواهند بود تا استراتژی درست نگهداری و تعمیرات را در زمان درست بکار گرفته تا توقفات ناخواسته را حداقل نمایند.در این مقاله سعی شد که با استفاده از کاربردهای تابع ویبول نگهداری یک کمپرسور رفت و برگشتی مدیریت شود که نتایج زیر حاصل گردید:

- زمان تا خرابی سیلندرهای کمپرسور و قابلیت اطمینان آن با استفاده از محاسبه پارامترهای ویبول و محاسبات مرتبط بدست آمد.
- از تابع ویبول برای تخمین زمان بهینه تعویض پیشگیرانه یک سیلندر کمپرسور و همچنین مقایسه هزینه تعویض پیشگیرانه در مقابل تعمیر اصلاحی استفاده شد.
- تعداد توقف مورد نیاز تجهیز جهت انجام نگهداری و تعمیرات تخمین زده شد که از این اطلاعات میتوان در تخمین توقفات و برنامه ریزی تولید استفاده نمود.
- تعداد قطعات مورد نیاز جهت سفارش گذاری با استفاده از آنالیز ویبول پیش بینی شد.
- اثربخشی اقدامات اصلاحی با استفاده از تکنیک شبیه سازی پیش بینی گردید.

پیشنهاد می‌گردد محققان در تحقیقات آینده در خصوص مدل سازی خرابی تجهیزات سرمایه ایی در صنایع مادر مثل نفت و گاز فعالیت کرده تا بتوان با استفاده از مدل های ارائه شده بومی ، پیش بینی از الگوی خرابی و قابلیت اطمینان این تجهیزات بدست آورده و این مدل ها برای هرچه بیشتر کردن سطح دسترسی تجهیزات و قابلیت اطمینان آنان استفاده گردد.

منابع

Oussef, S. E. (2020). Asset life assessment by utilizing Weibull analysis with application on tank bottom components. *In 2020 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance,* pp1-7. IEEE.

Hallinan Jr.A. J. (2018). A Review of the Weibull Distribution. *Journal Of Quality.* pp 85-95.

Simpson, F. M. (1994). The Use of Weibull Analysis Methods in Assessing Field Failure Problems.

International Compressor, Engineering Conference. Paper 973.

Afonso Sellitto, M. (2020). Analysis of maintenance policies supported by simulation in a flexible manufacturing cell. *Ingeniare Revista chilena de ingeniería, 28*(2), 293-303.

Sgarbossa, F., Zennaro, I., Florian, E., & Calzavara, M. (2020). Age replacement policy in the case of no data: The effect of Weibull parameter estimation. *International Journal of Production Research.* 58(19).

Hu, W, Yang, Z., Chen, C., Wu, Y., & Xie, Q. (2021). A Weibull-based recurrent regression model for repairable systems considering double effects of operation and maintenance: A case study of machine tools. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 213.

Corvaro, F. Giacchetta, G. Marchetti, B. Recanati, M. (2017). Reliability, Availability, Maintainability (RAM)study, on reciprocating compressors API 618", Science Direct, Volume 3, Issue 2, 266-272.

Pham, H. (2006). Springer Series in Reliability Engineering", Springer-Verlag London Limited.

Bose, D., Ghosh, G., Mandal, K., Sau, S.P., & Kunar, S., (2013). Measurement and Evaluation of Reliability, Availability and Maintainability of a Diesel Locomotive Engine. *International Journal of Scientific and Research Publications,* Volume 3, Issue 9.

Barlow, R. Hunter, L. (1959). Optimum Preventive Maintenance Policies.

Innal, F. (2005). Monte Carlo (MC) simulation for system reliability", Norwegian University of Science and Technology.

Singh, C. Mitra, J. (2006). Monte Carlo Simulation for Reliability Analysis of Emergency and Standby Power Systems" Department of Electrical Engineering, Texas A & M University, College Station, Texas 77843