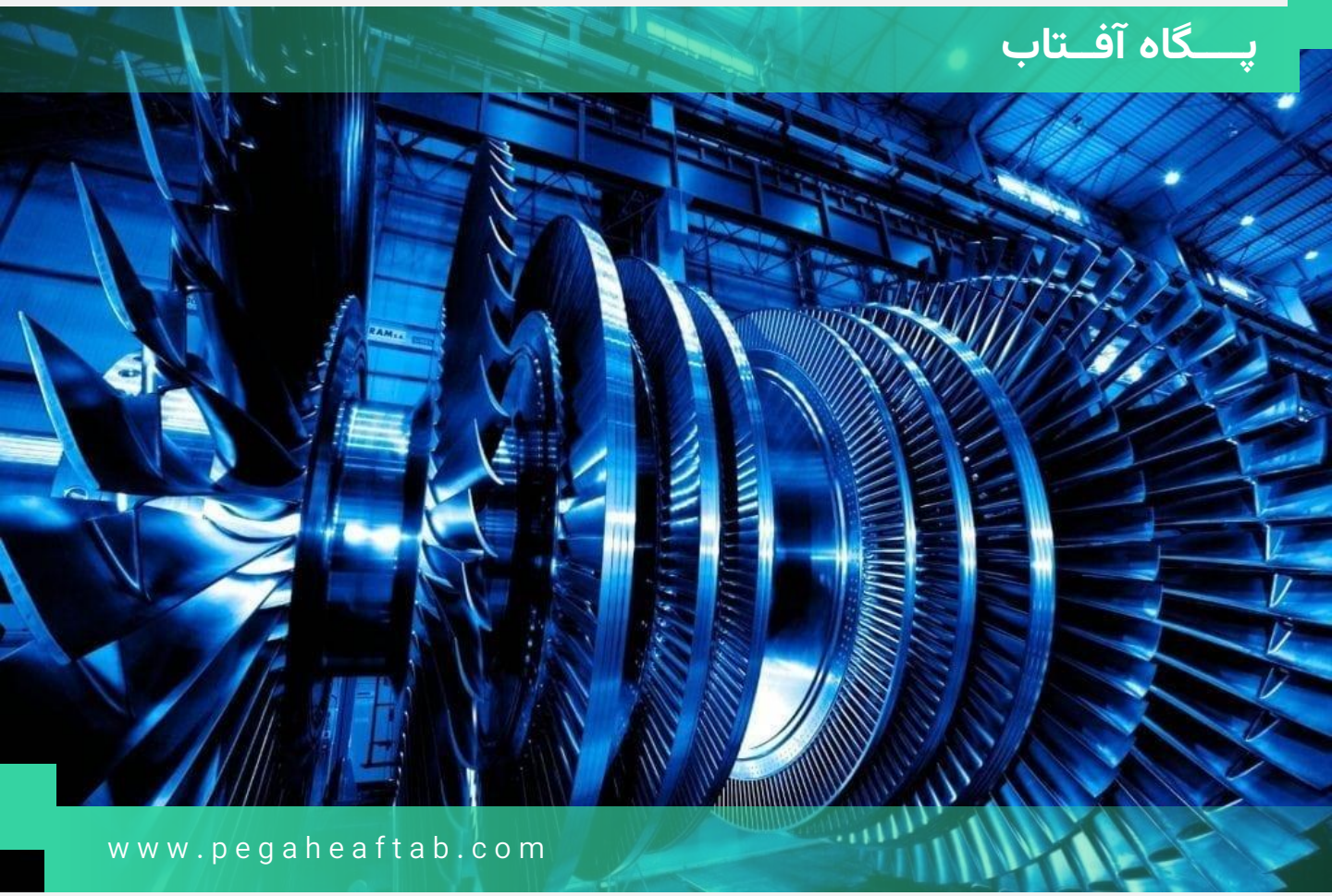
مهندسی قابلیت اطمینان

نگرشی مبتنی بر چرخهٔ عمر تجهیز

(فصل اول)

پـــگاه آفـتاب



www.pegaheaftab.com

نویسنده: دکتر ادگار بردلی

فصل ۱
اصول قابلیت اطمینان ۱
اجزای قابلیت اطمینان

«من اغلب می‌گویم زمانی دربارهٔ موضوعی می‌دانید که بتوانید چیزی را که درباره‌اش صحبت می‌کنید اندازه‌گیری کنید و آن را در قالب اعداد بیان کنید. و زمانی که نمی‌توانید آن را اندازه‌گیری کنید یا آن را به صورت عدد و رقم بیان کنید، نشان می‌دهد که دانش شما کم‌مایه و ناکافی است؛ این ممکن است آغاز دانش باشد، اما به سختی در اندیشه‌های خود به مرحله علم رسیده‌اید، هر موضوعی که باشد.
لرد کلوین[1]

مقدمه

اهمیت قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان گاهی به شکلی ناقص تعریف می‌شود، اما همیشه در نظر مهندسان حرفه‌ای و افراد عادی به یک اندازه مهم است. هیچ کس محصولی غیرقابل اعتماد نمی‌خواهد. با گذشت زمان، محصولات تمایل به قابل اعتمادتر شدن پیدا می‌کنند. برای مثال، به طور واضحی خودروهای قرن بیست و یکم نسبت به خودروهای دهه ۱۹۴۰ قابل اعتمادتر هستند. دلیل این امر حجم عظیم تولید وسایل نقلیه موتوری است؛ که سازندگان را قادر ساخته و مجبور کرده تا نقص‌هایی را که بازار آن‌ها را برجسته کرده است، اصلاح کنند. روش «امتحان – رفع نقص – امتحان» در واقع قدیمی‌ترین روش بهبود قابلیت اطمینان است. هرچند در طول زمان از روش‌های علمی‌تر دیگری نیز استفاده شده است، اما روش «امتحان – رفع نقص – امتحان» به صنعت خودرو به خوبی خدمت کرده است. برای سیستم‌هایی غیر از صنعت وسایل نقلیه موتوری، بهبود قابلیت اطمینان به کندی اتفاق می‌افتد، مگر اینکه از تکنیک‌های خاصی برای اجبار به بهبود قابلیت اطمینان استفاده شود. صنعت هواپیماسازی، که تعداد تولید بسیار کمتری نسبت به خودرو دارد، نمونه بارز این موضوع است. کارخانه‌های شیمیایی و سایر انواع کارخانه‌های تولیدی نیز همینطور هستند.

تاریخچه

مهندسی قابلیت اطمینان شاخه مجزایی از مهندسی است که در طول جنگ جهانی دوم توسعه یافته است. در واقع، مهندسی به عنوان یک رشته از زمان ظهور آن به عنوان یک حرفه در قرن ها پیش، به زیرشاخه های تخصصی تر تقسیم شده است. می‌توان گفت که مهندسی قابلیت اطمینان از مهندسی هوافضا، که خود زیرمجموعه ای از مهندسی مکانیک است، منشق شده است. همچنین متاسفانه باید گفت که همانطور که در مورد بسیاری از پیشرفت‌های مهندسی دیده می‌شود، این جو و اقتضای زمانهٔ جنگ بود که محرک توسعه حرفه مهندسی قابلیت اطمینان بود. رابرت لوسر[2]، مهندسی آلمانی، در برنامه سلاح V1[3] برای نیروی هوایی آلمان (لوفت وافه) مشارکت داشت. (جزئیات بیشتر

---

[1] ویلیام اکبر تامسون، بارون کلوین اول، (زادهٔ ۱۸۲۴، درگذشتهٔ ۱۹۰۷)، که بیشتر با نام لُرد کلوین (Lord Kelvin) مشهور است، ریاضیدان و فیزیک‌دان و مهندس بریتانیایی و یکی از پیشگامان مهم علوم طبیعی در قرن نوزدهم بود.

[2] Robert Lusser

[3] فیزِلر فی ۱۰۳ که عموماً با عنوان فاو-۱ یا وی-۱ شناخته می‌شود، نخستین موشک کروز نظامی بود که سال ۱۹۴۴ در گرهارت-فیزلر-ورکه در آلمان تولید و حدود ۱۲ هزار فروند از آن در ماه‌های پایانی جنگ جهانی دوم در سال ۱۹۴۵، عموماً علیه اهدافی در بریتانیا، به‌کار برده شد.

در این مورد در فصل ۲ ارائه خواهد شد.)
چندین مفهوم اولیه از مهندسی قابلیت اطمینان به او نسبت داده می‌شود.

تعاریف

لوسر یکی از خیل عظیم مهندسان و دانشمندان آلمانی بود که پس از جنگ جهانی دوم به ایالات متحده مهاجرت کرد و بخشی از برنامه‌های موشک و فضایی آمریکا شد .در سال ۱۹۵۶، در سمپوزیومی در کارخانه هواپیماسازی کانویر[4] در سن دیگو، او برای اولین بار قابلیت اطمینان را با اصطلاحات مهندسی تعریف کرد. او قابلیت اطمینان[5] در مهندسی را به شرح زیر تعریف کرد.

قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان به معنای احتمال این است که یک سیستم برای مدت زمان معین و با شرایط کاری مشخص، به کار خود ادامه دهد. از این تعریف می‌توان موارد زیر را استنتاج کرد:

- اصطلاح احتمال در این تعریف نشان می‌دهد که مهندسی قابلیت اطمینان با آمار سر و کار دارد.
- قابلیت اطمینان در مهندسی تابعی از زمان است.
- قابلیت اطمینان در مهندسی به شرایط ذکر شده بستگی دارد. مثلا تجهیزاتی که برای استفاده در قطب جنوب طراحی شده است، ممکن است در بیابان به خوبی کار نکنند.

اهمیت قابلیت اطمینان از نظر مهندسی این است که یک پارامتر مهندسی است، درست مانند بازده، توان یا هر پارامتر دیگری. تفاوت بین پارامترهای مهندسی قابلیت اطمینان و پارامترهای سنتی‌تر این است که آنها اغلب آماری هستند یا فقط پس از یک دوره نسبتاً طولانی قابل اندازه‌گیری هستند. به عنوان مثال، بازده یک موتور الکتریکی را می‌توان در عرض چند دقیقه پس از راه‌اندازی و اعمال بار روی موتور تعیین کرد. قابلیت اطمینان موتور اما فقط پس از یک دوره عملیاتی طولانی، شاید سال‌ها، قابل تشخیص است. همچنین، پاسخ‌هایی که به دست می‌آوریم قطعی نیست و صرفاً آماری و احتمالی هستند. پاسخ‌ها در محاسبهٔ قابلیت اطمینان همیشه باید با محدودیت‌های خطای آماری همراه باشد. قابلیت اطمینان معمولا با R(t) نشان داده می‌شود.
معیارهای رایج قابلیت اطمینان عبارتند از میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF)، میانگین زمان خرابی (MTTF) و دوره عملیاتی بدون نیاز به نگهداری و تعمیرات (MFOP). برای میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF) اغلب از نماد θاستفاده می‌شود.

تعاریف مهم دیگر در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.

قابلیت نگهداشت (نگهداشت‌پذیری)

قابلیت نگهداشت[6] به احتمال بازیابی یک سیستم بعد از خرابی، در یک زمان مشخص و با در نظر گرفتن یک محیط نگهداری خاص، اشاره دارد.
بنابراین، همانطور که می بینیم، قابلیت نگهداشت مشابه قابلیت اطمینان است. قابلیت نگهداشت یک تابع آماری

[4] Convair
[5] reliability
[6] Maintainability

است، تابعی از زمان است و به شرایط خاصی، یعنی محیط نگهداری بستگی دارد. قابلیت نگهداشت معمولاً با M(t) نشان داده می‌شود.
یک شاخص رایج برای قابلیت نگهداشت، میانگین زمان تعمیر (MTTR) است .نماد استفاده شده برای MTTR معمولاً ϕ است .در ادامه متن به MTTR بیشتر پرداخته شده است.

دسترسی‌پذیری (در دسترس بودن)

دسترسی‌پذیری[7] یا در دسترس بودن، درصد زمانی است که یک سیستم برای استفاده در دسترس است، چه به آن نیاز باشد یا خیر.

دسترسی‌پذیری، برخلاف اهداف ما، یک تابع آماری نیست. و تنها به سادگی در قالب یک درصد ساده بیان می‌شود. دسترسی‌پذیری یک پارامتر پایه مانند قابلیت اطمینان یا قابلیت نگهداشت نیست، بلکه در واقع از آنها گرفته شده است. با این حال، در مورد سیستم‌های تحت نگهداشت، دسترسی‌پذیری مهم‌ترین پارامتر است و معمولاً اندازه‌گیری می‌شود. دسترسی‌پذیری معمولاً با حرف بزرگ A در فرمول‌های قابلیت اطمینان نشان داده می‌شود، مانند آنچه در اینجا آمده است:

$$A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

یا

$$A = \frac{\theta}{\theta + \phi}$$

غیرقابل اطمینان

غیرقابل اطمینان بودن[8]، مکمل قابلیت اطمینان است و معمولاً با F بزرگ نشان داده می‌شود.
به عبارت دیگر، $R + F \equiv 1$ که به شرح زیر تعریف می‌شود:

غیرقابل اطمینان بودن، احتمال خرابی یک سیستم قبل از زمانی معین، با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی خاص است.

عدم در دسترس بودن [9]

این پارامتر معمولاً با U بزرگ نشان داده می‌شود و مکمل دسترسی‌پذیری است.

جزء (کامپوننت)

جزء یا اجزاء، بخشی از یک سیستم است که غیرقابل تعمیر است و هنگامی که خراب می‌شود، جایگزین می‌شود.

---

[7] Availability
[8] UNRELIABILITY
[9] UNAVAILABILITY

ضریب همبستگی

ضریب همبستگی، یا به طور ساده همبستگی، مقیاسی از میزان انطباق نقاط داده با یک نمودار خطی است. اگر همه نقاط روی خط قرار بگیرند، همبستگی ۱۰۰ درصد است. هرچه همبستگی بیشتر باشد، اطمینان ما از انطباق داده‌هایمان با معادله داده شده بیشتر می‌شود.

سیستم

سیستم مجموعه‌ای از اجزاست (کامپوننت). یک سیستم را می‌توان با تعویض اجزای آن یا بازسازی یا احیای زیرسیستم‌های آن بازیابی کرد.

خرابی

خرابی[10]، ناتوانی یک جزء یا سیستم برای ادامهٔ عملکرد خود است. خرابی‌ها را می‌توان به دو نوع خرابی اصلی تقسیم‌بندی کرد: ۱. **خرابی‌های فاجعه آمیز که** به طور ناگهانی و کامل رخ می‌دهند. ۲. **خرابی‌های تدریجی که خرابی‌های** موردی هستند که در آن‌ها سیستم یا جزء به تدریج توانایی عملکرد خود را از دست می‌دهد. چنین خرابی‌هایی در سیستم‌های مهندسی رایج هستند. این نوع خرابی‌ها باید توسط همه ذینفعان تعریف و توافق شود. به عنوان مثال، اگر فشار خروجی یک پمپ به زیر ۸۰ درصد در زمان نو بودن برسد، ممکن است توافق کنیم که این یک خرابی است و نیاز به خاموش شدن پمپ دارد. درصد و محدودهٔ تعریف‌شده بستگی به تأثیر کاهش فشار بر بقیه سیستم دارد.

نرخ خرابی[11]

نرخ خرابی به تعداد خرابی‌ها به ازای واحد زمان گفته می‌شود.

تابع چگالی احتمال خرابی [12]

این تابع، احتمال خرابی در یک زمان خاص را نشان می‌دهد. این تابع معمولا با f(t) نشان داده می‌شود. توجه داشته باشید که با f کوچک نشان داده می‌شود و نباید با شاخص غیرقابل اطمینان بودن که به صورت F(t) با F بزرگ نشان داده نمی‌شود؛ اشتباه نشود.

نمونه آماری

نمونه مجموعه‌ای از آیتم‌هایی است که از یک جامعه مادر (جامعه آماری) انتخاب می‌شوند تا اطلاعاتی در مورد کل جامعه ارائه دهند.

جامعه آماری

جامعه (جامعه آماری) مجموعه کاملی از مقادیر یک متغیر است. اطلاعات مربوط به یک جامعه از طریق نمونه‌گیری از آن جامعه به دست می‌آید.

---

[10] FAILURE

[11] Failure Rate

[12] Failure Probability Density Function

فهرست اصطلاحات

فهرستی از اختصارات که در فصل‌های بعدی به کار خواهد رفت، در اینجا آمده است.

- **ABD** نمودار بلوک دسترسی‌پذیری - availability block diagram
- **DCF** تنزیل جریان نقدی - discounted cash flow
- **FMEA** آنالیز حالات و اثرات خرابی - failure modes and effects analysis
- **FMECA** آنالیز حالات خرابی، اثرات و بحرانیت آن - Failure Modes and Effects Criticality Analysis
- **FRACAS** سیستم گزارش‌دهی خرابی و اقدام اصلاحی - Failure Reporting and Corrective Action System
- **FTA** آنالیز درخت عیوب - Fault Tree Analysis
- **KPI** شاخص کلیدی عملکرد - Key Performance Indicator
- **LCC** هزینه چرخه عمر - Life Cycle Costing
- **MDT** میانگین زمان خرابی - Mean Downtime
- **MFOP** دوره عملیاتی بدون نیاز به نگهداری و تعمیرات - Maintenance-Free Operating Period
- **MTBF** میانگین زمان بین خرابی‌ها - Mean Time Between Failures
- **MTTF** میانگین زمان تا خرابی - Mean Time to Failure
- **MTTR** میانگین زمان تعمیر - Mean Time to Repair
- **RBD** نمودار بلوک قابلیت اطمینان - Reliability Block Diagram
- **RCA** تحلیل علت ریشه‌ای - Root Cause Analysis
- **RCM** نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان - Reliability-Centered Maintenance
- **RTF** اجرا تا خرابی - Run-To-Failure
- **TPM** نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر - Total Productive Maintenance

آمار پایه

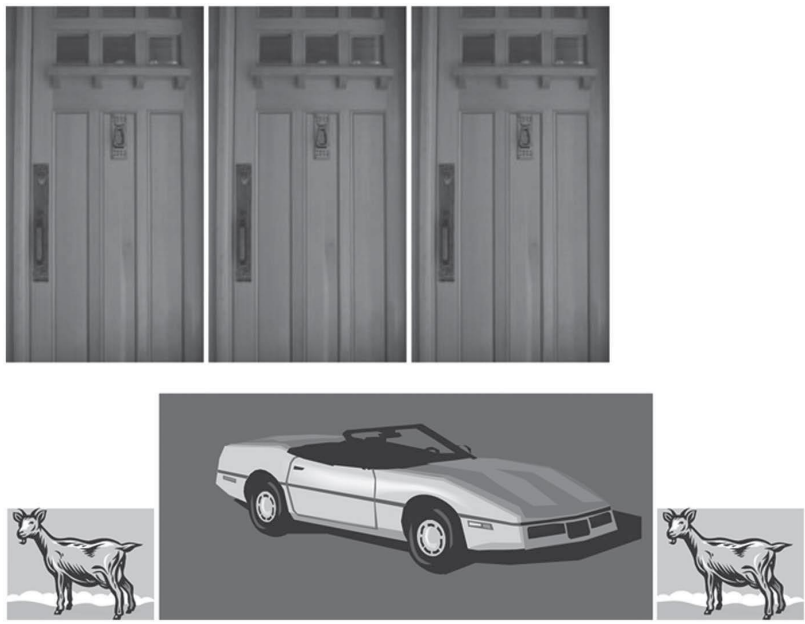
درک مهندسی قابلیت اطمینان بدون داشتن دانش اولیه‌ای از آمار غیرممکن است.

احتمال

اولین مفهومی که باید در آمار درک کرد، مفهوم احتمال است. یکی از فرهنگ لغت‌ها، احتمال را به عنوان «معیاری از احتمال وقوع یک رویداد تعریف می‌کند؛ عددی که بیانگر نسبت موارد مطلوب به کل موارد ممکن است.»
بنابراین، احتمال را می‌توان به صورت درصدب بین ۰ درصد و ۱۰۰ درصد یا به صورت عددی بین ۰ و ۱ بیان کرد. به عنوان مثال اگر قابلیت اطمینان یک دستگاه در ۲۰۰۰ ساعت ۹۰ درصد باشد، به این معنی است که ۹۰ درصد احتمال دارد که به طور مداوم به مدت ۲۰۰۰ ساعت کار کرده باشد. برای برخی، تصور این موضوع دشوار است. راه بهتری برای درک این موضوع این است که فرض کنیم ۱۰۰ عدد از این دستگاه‌ها را داریم. سپس، برای قابلیت اطمینان ۹۰ درصد در ۲۰۰۰ ساعت، ۹۰ عدد از آنها در ۲۰۰۰ ساعت همچنان کار می‌کنند و ۱۰ عدد از آن‌ها قبل از ۲۰۰۰ ساعت خراب می‌شوند.
برخی افراد آمار را موضوعی دشوار می‌دانند زیرا برخی از نتایج (صحیح) به دست آمده توسط آمارگران با شهود عامه مغایرت دارد. به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد آنها با عقل سلیم در تضاد هستند.
ساده‌ترین این مشکلات احتمالا مربوط به پرتاب سکه (شیر یا خط) است. فرض کنید می‌بینید که یک سکه سه بار به هوا پرتاب شده است و هر بار شیر آمده است. فکر می‌کنید در پرتاب چهارم چه اتفاقی می‌افتد؟ شیر یا خط؟ پاسخ

این است که پیشینهٔ شیر یا خط آمدن اهمیتی ندارد؛ و در پرتاب جدید ۵۰ درصد احتمال شیر و ۵۰ درصد احتمال خط آمدن سکه وجود دارد. این مفهوم تصادفی بودن را به ما معرفی می‌کند که بعداً در مبحث قابلیت اطمینان دوباره با آن مواجه خواهیم شد.
یک مثال دشوارتر از عجیب بودن آمار، مسئله مانتی هال است که در شکل ۱.۱ آمده است.
برای نمایش ماهیت خلاف شهود آمار، در اینجا به مشکلی می‌پردازیم که به مساله یا پارادوکس مونتی هال معروف شده است. مونتی هال مجری یک برنامه مسابقه تلویزیونی در آمریکای شمالی بود که معمای زیر را برای شرکت‌کنندگان مطرح کرد: روی صحنه سه در بسته وجود دارد. پشت دو تا از درها بز قرار دارد و پشت یکی از درها یک ماشین قرار گرفته است. مجری برنامه مسابقه از مکان بزها و ماشین مطلع است و شرکت‌کننده از این موضوع بی اطلاع است. مجری هیچکدام از درها را حرکت نمی‌دهد. و از شرکت‌کننده در مسابقه می‌خواهد که یکی از درها را انتخاب کند و اگر در انتخابی او دری بود که پشتش ماشین قرار دارد شرکت‌کننده برندهٔ آن خودرو می‌شود. و اگر پشت در انتخابی او بز بود او با دست خالی استودیو را ترک می‌کند.

پس از اینکه شرکت‌کننده یکی از درها را انتخاب می‌کند که باز شود، مجری پیش از باز شدن آن در یکی از درهای دیگر که پشتش بز (پوچ) است را باز می‌کند.
اکنون دو در بسته وجود دارد. پشت یکی بز است و پشت دیگری ماشین. سپس مجری از شرکت‌کننده می‌پرسد که آیا می خواهد قبل از باز شدن در انتخابی خود، انتخابش را تغییر دهد یا خیر.



شکل ۱.۱: مسالهٔ مونتی هال

تکلیف

سوال این است که آیا شرکت‌کننده با تغییر انتخاب خود، شانس خود را برای برنده شدن ماشین افزایش می‌دهد؟ پاسخ خود را با استفاده از احتمالات محک بزنید.

تابع چگالی احتمال رخداد خرابی

در آمار، ما اغلب با گروه‌هایی از موارد سر و کار داریم. گاهی اوقات از یک گروه به عنوان نمونه (نمونه آماری) و گاهی به عنوان جامعه (جامعه آماری) یاد می‌شود. این امر ما را به بحث در مورد مفهوم مهم تابع چگالی احتمال خرابی، که همچنین به عنوان توزیع خرابی شناخته می‌شود، هدایت می‌کند.
این تابع می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد که چندین مورد از آنها در کارهای مربوط به قابلیت اطمینان رایج هستند. چهار مورد از رایج ترین آن‌ها عبارتند از:

- مرگ و میر نوزادان (خرابی در ابتدای کار)
- توزیع نمایی منفی
- توزیع نرمال
- توزیع ویبول Weibull

همه این توزیع‌ها در تحلیل انواع خرابی مفید هستند. در این فصل، این چهار تابع به روش‌های مختلف ارائه خواهند شد:

- به عنوان یک نمودار خطی ساده مبتنی بر زمان
- به عنوان نموداری از نرخ خرابی مبتنی بر زمان
- به عنوان نموداری از تابع چگالی احتمال رخداد خطا مبتنی بر زمان

نمودار خطی مبتنی بر زمان که در این‌جا ارائه شده است، برای ایجاد یک درک اولیه مفید است. با این حال، به طور معمول به دلیل طولانی بودن بازه‌های زمانی که در عمل استفاده می‌شوند، این نمودار کاربردی ندارد. اگر از مقیاس لگاریتمی برای زمان استفاده شود، دیگر این نمودار باارزش نیست، زیرا هدف نمایش تعداد خرابی‌ها روی یک محور زمان بدون انحراف است.
نمایش نرخ خرابی که تعداد خرابی‌ها به ازای واحد زمانی را نشان می‌دهد، روشی بسیار رایج است. در اینجا، محور زمان اغلب به صورت لگاریتمی بیان می‌شود.

روش سوم نمایش، ترسیم احتمال خرابی مبتنی بر زمان است. نمودار حاصل، تابع چگالی احتمال رخداد خرابی، f(t) نامیده می‌شود.

سه الگوی خرابی رایج

یکی از انواع الگوهای خرابی که ممکن است آشکار شود، مرگ و میر نوزادان (خرابی در مراحل اولیه) است. این اصطلاح به این دلیل به کار می‌رود که مطالعات آماری اولیه در این باره برای نخستین بار توسط آمارگران پزشکی انجام شده است و سپس این مفهوم توسط مهندسان به‌کار گرفته شد. از این رو این اصطلاح به کار رفت، که آمارگران پزشکی با طول عمر جمعیت انسانی سروکار داشتند. در این مورد، همانطور که در شکل ۱.۲ نشان داده شده است، خرابی‌ها در ابتدای نمودار متمرکز می‌شوند.

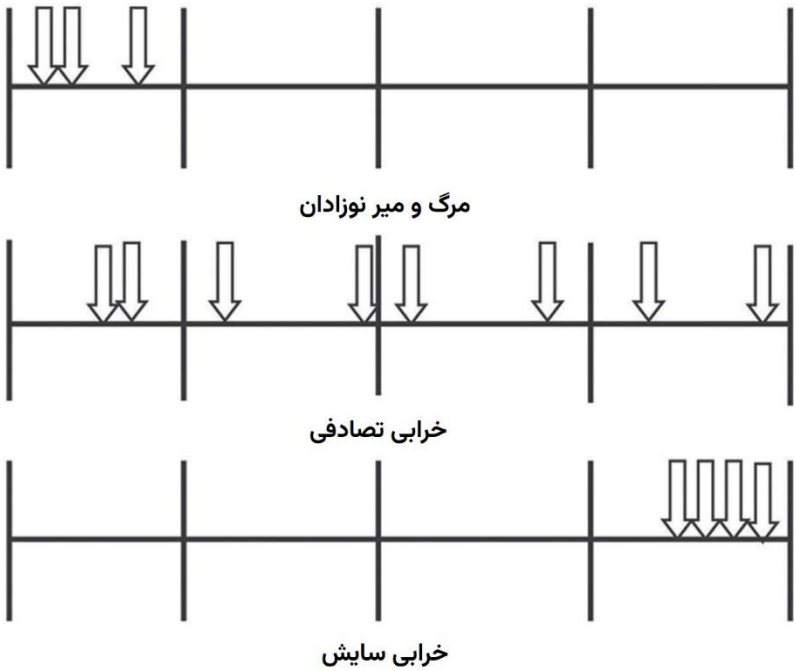
در شکل ۱.۲، در هر حالت، چهار دوره داریم، اما می‌بینیم که در نمودار بالایی، همه خرابی‌ها در همان اوایل اتفاق می‌افتند. این الگوی مرگ و میر نوزادان است. در اینجا یک نکته احتیاطی ضروری است. فقط به این دلیل که مرگ و میر نوزادان در قطعات و سیستم‌های مهندسی وجود دارد، به این معنی نیست که باید آن را پذیرفت. مرگ و میر نوزادان همیشه نشانه‌ای از یک مشکل کیفی است؛ چه از طرف تامین‌کننده و چه از طرف نصب‌کننده قطعه. هرگز نباید حالت مرگ و میر نوزادان را اجتناب‌ناپذیر دانست. همیشه باید منبع آن را پیدا کرد و آن را حذف کرد.

نمودار مرکزی در شکل ۱.۲، خرابی تصادفی را توصیف می‌کند که با نام نرخ خرابی ثابت نیز شناخته می‌شود. سوالی که در ذهن برخی ایجاد می‌شود این است که: «اگر نرخ خرابی ثابت باشد، چگونه خرابی‌ها می‌توانند به صورت تصادفی رخ دهند؟» کلمه ثابت کلمه ثابت، حاکی از نوعی نظم و ترتیب است، این‌طور است؟ نمودار مرکزی در شکل ۱.۲ به رفع این سوءتفاهم کمک می‌کند. فرض کنیم در هر دوره (این دوره می‌تواند هر طول زمانی داشته باشد) دو خرابی داشته باشیم. در این صورت، خرابی‌ها می‌توانند در هر الگویی رخ دهند، به شرطی که در هر دوره دو خرابی وجود داشته باشد.

اگر نمودار مرکزی در شکل ۱.۲ را بررسی کنیم، می‌بینیم که دو خرابی اول بسیار نزدیک به هم هستند. ممکن است بر اساس این اطلاعات انتظار داشته باشیم که خرابی بعدی بلافاصله رخ دهد، اما این‌طور نیست. یک دوره طولانی‌تر وجود دارد و سپس خرابی بعدی رخ می‌دهد. اما قبل از خرابی بعدی یک دوره حتی طولانی‌تر و سپس قبل از خرابی بعدی یک دوره کوتاه‌تر وجود دارد. با این حال، نرخ خرابی در هر دوره ثابت و برابر دو است. بنابراین، نرخ خرابی ثابت و خرابی تصادفی به یک معنا هستند.

نوع کاملاً متفاوتی از الگوی خرابی در نمودار پایین شکل ۱.۲ نشان داده شده است، جایی که در مجموعِ چهار دوره، چهار خرابی وجود دارد، اما همه آن‌ها در دوره پایانی رخ داده‌اند. این یک الگوی خرابی سایش [13] است و در بررسی قابلیت اطمینان نیز به شکل شایعی با آن مواجه می‌شویم. این الگو از نظر ریاضی با معادله توزیع نرمال توصیف می‌شود.

[13] wearout failure pattern



شکل ۱.۲: سه الگوی خرابی

توزیع نمایی منفی

این توزیع در شکل ۱.۳ نشان داده شده است. توزیع نمایی منفی به صورت زیر است:

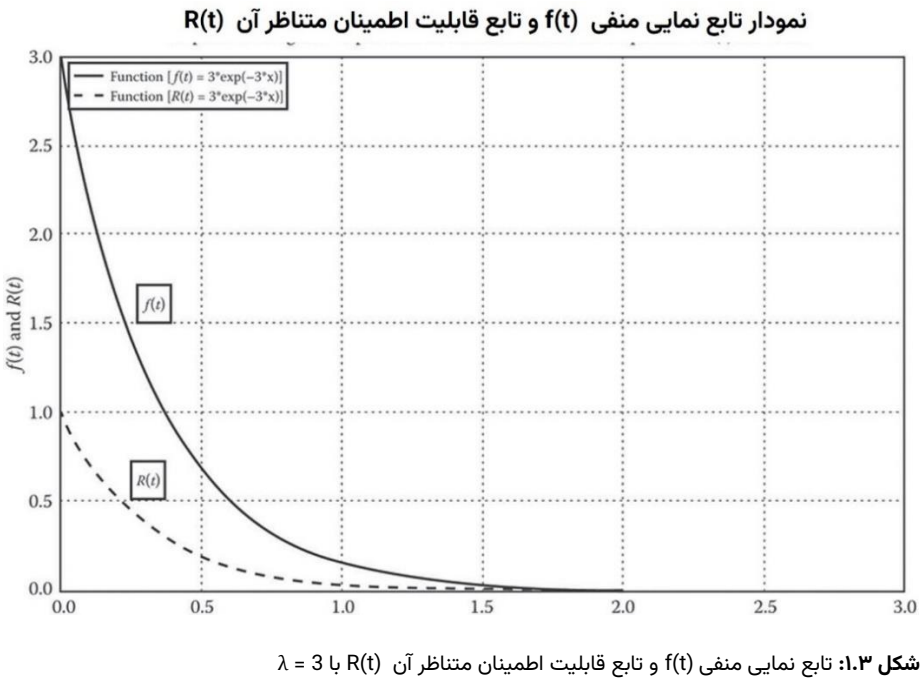
$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

و تابع قابلیت اطمینان مربوط به آن به صورت زیر است:

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

در این فرمول λ نرخ خرابی است. مشخص است که این یک توزیع تک پارامتری است. علاوه بر این، پارامتر λ به عنوان یک فاکتور ثابت در نظر گرفته می‌شود. معکوس این نرخ خرابی، زمان متوسط بین خرابی‌ها (MTBF) است. نماد رایج برای MTBF ، θ است. بنابراین θ همچنین میانگین توزیع است.

توزیع خرابی نمایی منفی، پدیده خرابی تصادفی را توصیف می‌کند و نشان می‌دهد سابقه خرابی‌های قبلی بی ربط هستند و در پیش بینی زمان وقوع خرابی بعدی کاربردی ندارند. متاسفانه خرابی تصادفی در بسیاری از سیستم ها یک واقعیت است و نتیجه این است که در چنین مواردی، نگهداری و تعمیرات بابرنامه یا پیشگیرانه امکان‌پذیر نیست.



شکل ۱.۳: تابع نمایی منفی f(t) و تابع قابلیت اطمینان متناظر آن R(t) با $\lambda = 3$

ریاضیات تصادفی

نرخ خرابی ثابت نشان می‌دهد که سیستم حافظه‌ای ندارد. بنابراین، بر اساس سوابق گذشته نمی‌توان پیش‌بینی کرد که چه زمانی خرابی‌ها رخ می‌دهند. مثال زیر را در نظر بگیرید:
طول عمر برخی از تجهیزات مهندسی از توزیع نمایی منفی با میانگین عمر ده سال پیروی می‌کند. احتمال خرابی تا پایان سال بعد برای تجهیزاتی که تا به حال دوام آورده اند چقدر است:

سه سال؟
هشت سال؟

در مورد سه سال، احتمال خرابی قبل از سه سال با F(3) = 1 - exp(-λt) نشان داده می‌شود، که در آن:

$$\lambda = (1/10) = 0.1$$
$$F(3) = 1 - \exp(-0.1 \times 3)$$
$$= 0.2592.$$

و احتمال خرابی بعد از چهار سال عبارت است از:

$$F(4) = 1 - \exp(-0.1 \times 4)$$
$$= 0.3297.$$

احتمال خرابی در سال هشتم:

$$P(\text{failure in the fourth year}) = \frac{F(4) - F(3)}{1 - F(3)} = \frac{0.3297 - 0.2592}{1 - 0.2592} = 0.0951.$$

یک محاسبهٔ مشابه نشان می‌دهد که احتمال خرابی در سال نهم = ۰.۰۹۵۱

بنابراین، در توزیع نمایی منفی، سن یک قطعه در تعیین این‌که آیا آن قطعه تا پایان دوره بعد دوام خواهد آورد یا نه، بی‌اهمیت است.
این موضوع برای ما که به دنبال پیش‌بینی خرابی هستیم، خبر بدی است، اما در مورد استفاده مجدد از قطعات[14] خبر خوبی است. قطعاتی که نرخ خرابی ثابتی دارند را می‌توان به شرطی که به درستی از آن‌ها استفاده شود، مجدداً به کار گرفت.
در واقع، این موضوع در مورد تلفن‌های همراه و رایانه‌ها صادق است. تراشه‌های موجود در این وسایل نو نیستند.

[14] cannibalization

آن‌ها تحت فرایندی به نام «سوختگی پیکسل صفحه‌نمایش» یا burn-in قرار می‌گیرند که باعث حذف قطعاتی می‌شود که در اثر حالت مرگ و میر نوزادان خراب می‌شوند.

قطعات باقیمانده که از این فرایند جان سالم به در می‌برند، حتی با وجود اینکه ممکن است ساعت‌ها تحت «سوختگی پیکسل صفحه‌نمایش» قرار گرفته باشند، به عنوان قطعه کاملاً نو فروخته می‌شوند.

توزیع نرمال

توزیع نرمال یک توزیع دو پارامتری است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp - \left[\frac{(t-\theta)^2}{2\sigma^2} \right],$$

که در آن:

θ: نشان‌گر میانگین متغیر t (زمان)

σ: انحراف معیار توزیع حول میانگین

انحراف معیار، پراکندگی توزیع را در امتداد محور t اندازه‌گیری می‌کند و به عنوان فاصله میانگین تا نقطه‌ای از منحنی که شیب آن صفر می‌شود (و بر روی محور t عمود است) تعریف می‌شود. (برخلاف این، در توزیع نمایی منفی، $\theta = 1/\lambda$ است و هم میانگین و هم انحراف معیار توزیع را نشان می‌دهد.)

توزیع نرمال به عنوان یک تابع f(t) در شکل ۱.۴ نشان داده شده است.

هنگامی که به خرابی‌های از نوع خرابی سایش فکر می‌کنیم، ناخودآگاه یاد خرابی‌هایی ناشی از سایش و ساییدگی مانند لنت ترمز و صفحه کلاچ می‌افتیم که قطعاتی هستند که به مرور فرسوده می‌شوند. اما انواع دیگری از خرابی‌های سایش نیز وجود دارد. رایج‌ترین انواع خرابی‌های سایش به شرح زیر است:

- سایش[15]
- خوردگی[16]
- خستگی[17]

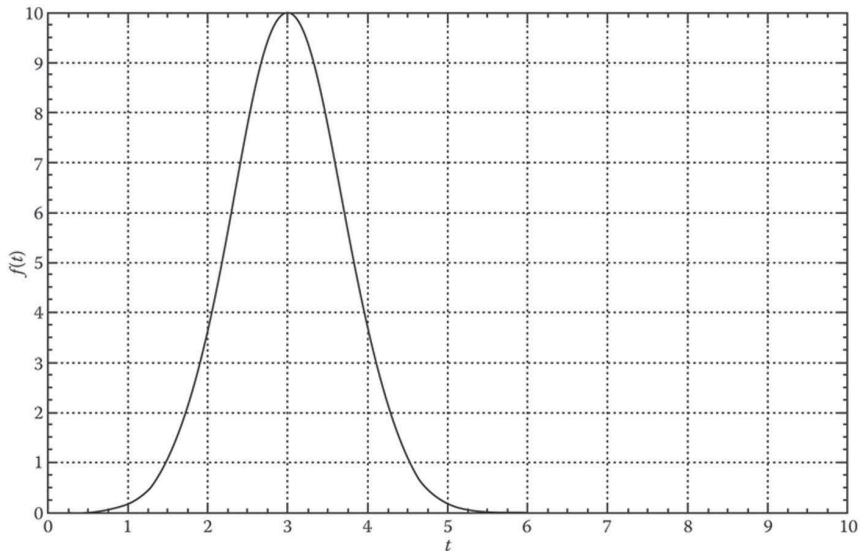
[15] Abrasion
[16] Corrosion
[17] Fatigue

- خزش[18]

توزیع ویبول

توزیع ویبول [19] با معادله زیر تعریف می‌شود :

$$f(t)=\frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^{2}}\exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right],$$



شکل ۱.۴: توزیع نرمال با θ = 3 و σ = 0.25

که در آن

$$f(t)=\frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t}. \qquad 1.7$$

همانطور که از شکل ۵.۱ می‌توان مشاهده کرد، توزیع ویبول شکل خود را بسته به مقدار β تغییر می‌دهد.

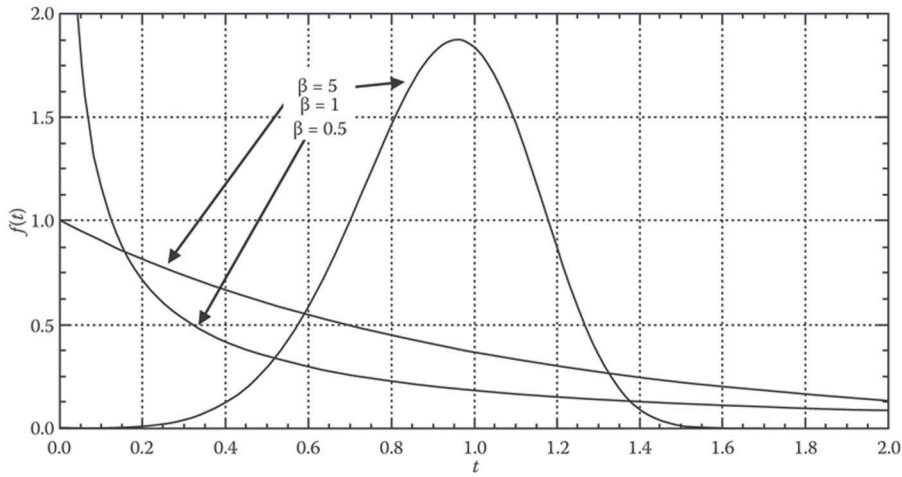
[18] Creep

[19] *Weibull*

اگر β کمتر از ۱ باشد: منحنی بسیار کج و بسیار شیب‌دار است و با احتمال خرابی مرگ و میر نوزادان مطابقت دارد.
اگر β برابر ۱ باشد: شکل منحنی، شکل خرابی تصادفی است.
اگر β بزرگ باشد (مثلاً بزرگتر از ۲): این توزیع، توزیع نرمال را تقلید می‌کند.

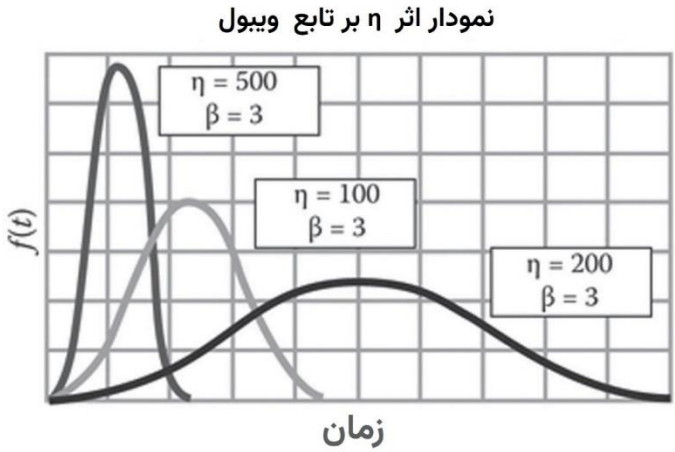
همانطور که دیدیم، توزیع ویبول می‌تواند سه توزیع دیگری که تاکنون در موردشان صحبت کرده‌ایم را تقلید کند و از این رو می‌تواند مدل‌ساز مناسبی برای مرگ و میر نوزادان، خرابی تصادفی و خرابی سایشی باشد.
همچنین دریافتیم که توزیع ویبول توزیعی با سه پارامتر است:

- **گاما[20] یا γ:** پارامتر موقعیت نامیده می‌شود. مقدار γ توزیع را در امتداد محور t جابه‌جا می‌کند. اگر γ مثبت باشد، قبل از توسعه معادله، مقادیر γ باید از t کم شوند.
- **بتا[21] یا β:** پارامتر شکل نامیده می‌شود .همانطور که از شکل ۵.۱ پیداست، تغییرات در مقدار β می‌تواند به طور چشمگیری بر شکل تابع تأثیر بگذارد.

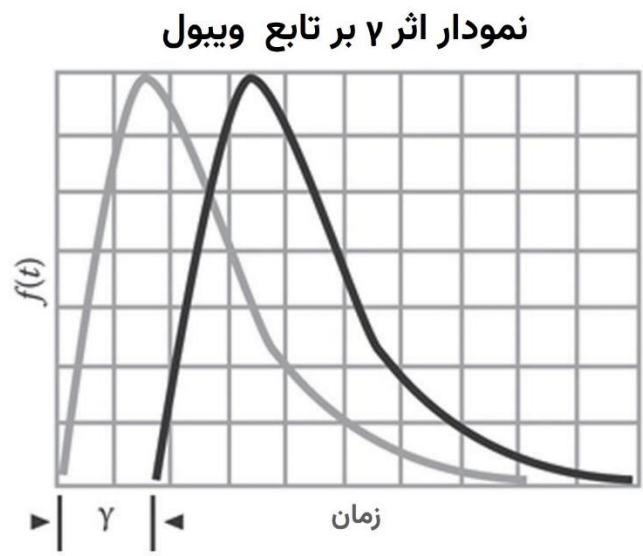


شکل ۱.۵: توزیع ویبول با γ = 0 و η = 1

[20] gamma
[21] beta



شکل ۱.۶: نمودار اثر η بر تابع ویبول



شکل ۱.۷: نمودار اثر γ بر تابع ویبول

- اتا [22] یا η: پارامتر مقیاس نامیده می‌شود. عملکرد آن تا حدودی شبیه به انحراف معیار توزیع نرمال است. تاثیر η بر توزیع، در حالی که مقادیر دیگر ثابت هستند، در شکل ۱.۶ نشان داده شده است. در حالی که شکل 1.7 تاثیر γ بر توزیع را نشان می‌دهد، در حالتی که η و β ثابت نگه داشته شوند.

[22] Eta

منحنی وان حمام

منحنی وان حمام[23] یکی از مدل‌های رایج در مهندسی قابلیت اطمینان است که به طور معمول به صورت نموداری از نرخ خرابی در مقیاس زمان نشان داده می‌شود، همانطور که در شکل ۱.۸ مشاهده می‌شود. توجه داشته باشید که برخلاف احتمال خرابی، معمولاً در منحنی وان حمام، نرخ خرابی روی محور افقی قرار می‌گیرد.

در شکل ۱.۸ از اصطلاحات متفاوتی استفاده شده است:

- دوره خرابی زودهنگام[24] مطابق با چیزی است که قبلاً مرگ و میر نوزادان نامیده می‌شد.
- دوره خرابی ذاتی[25] دوره خرابی تصادفی نامیده می‌شود. این دوره گاهی اوقات به عنوان دوره عمر مفید نیز شناخته می‌شود.
- دوره سوم، همانطور که قبلاً گفته شد، دوره خرابی سایش[26] است. شباهت این منحنی به برش عرضی یک وان حمام کاملاً مشهود است.

شکل ۱.۹ با جزئیات بیشتر، منحنی وان حمام را به عنوان مجموع منحنی‌های نرخ خرابی برای سه دوره‌ای که قبلاً توضیح داده شد، به تصویر می‌کشد.
منحنی وان حمام نه تنها برای مجموعه‌ای از قطعات بلکه برای سیستم‌ها نیز قابل اجرا است. این منحنی مدل مفیدی است، اما همیشه در عمل اتفاق نمی‌افتد.

منحنی وان حمام همچنین (بر اساس شواهد تجربی فراوان) برای سیستم‌های قابل تعمیر کاربرد دارد. در این مورد، محور عمودی نرخ تعمیر یا میزان وقوع خرابی[27] است.

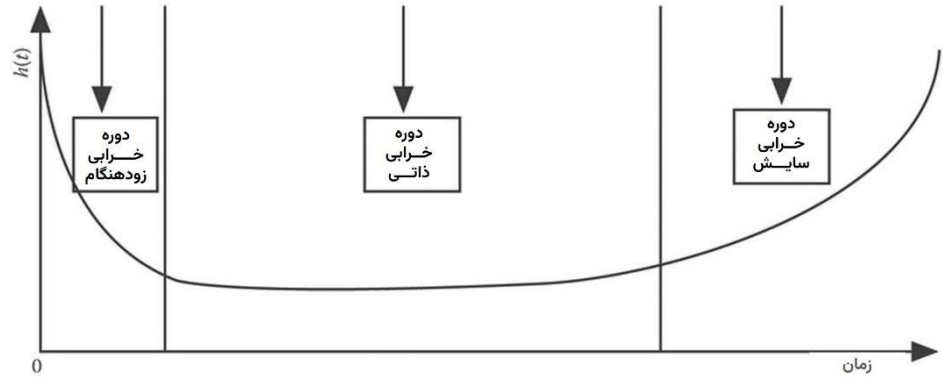
تحلیل ویبول

تحلیل ویبول[28] برای تحلیل داده‌های مربوط به خرابی به کار می‌رود. این تحلیل به ما نشان می‌دهد که آیا مجموعه خرابی‌ها مربوط به فاز اول، دوم یا سوم منحنی وان حمام است. از این تحلیل تنها می‌توان برای یک حالت خرابی[29] در آن واحد استفاده کرد. اغلب، داده‌ها شامل چندین حالت خرابی هستند که پیش از انجام هرگونه تحلیلی باید از یکدیگر جدا شوند. اگرچه این تحلیل از نظر سطحی روشی ساده به نظر می‌رسد، اما برای رسیدن به نتایج درست از طریق تحلیل، نیاز به تجربه قابل توجهی وجود دارد.

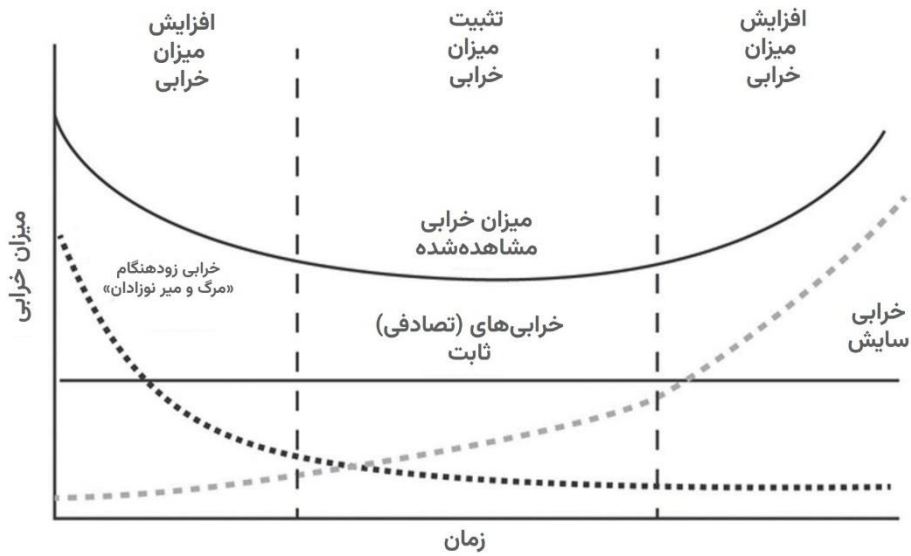
---

[23] Bathtub Curve
[24] Early failure period
[25] Intrinsic failure period
[26] Wearout failure period
[27] Repair Rate or the Rate of Occurrence of Failures (ROCOF)
[28] Weibull Analysis
[29] failure mode

FIGURE 1.8 The bathtub curve.



شکل ۱.۸: منحنی وان حمام



نمودار ۱.۹: منحنی وان حمام، نشان‌دهنده ترکیبی از سه منحنی نرخ خرابی

این تکنیک توسط پروفسور ویبول[30] در اواسط قرن گذشته، پیش از ظهور رایانه اختراع شد. در آن زمان، تحلیل با استفاده از کاغذهای گرافیکی مخصوص انجام می‌شد. اکنون با ظهور چندین برنامه قابل دانلود از اینترنت، دیگر نیازی به چنین تکنیک‌هایی نیست.

یکی از این برنامه‌ها Weibull-DR21 است که به صورت یک نسخه کاملاً کاربردی برای یک دوره آزمایشی رایگان ۴۵ روزه از اینترنت قابل دانلود است.

نمونه ۱.۱ :مدیریت داده‌های تعلیق‌شده

در هنگام استفاده از تحلیل ویبول، به طور معمول با داده‌های تعلیق‌شده مواجه می‌شویم (جدول ۱.۱) .منظور از داده‌های تعلیق‌شده، داده‌های مرتبط با قطعاتی است که قبل از خرابی از سرویس خارج شده‌اند، یا قطعاتی که در زمان انجام تحلیل هنوز در حال کار هستند، یا قطعاتی که به دلیل دیگری دچار خرابی شده‌اند. اگر در تحلیل فقط از داده‌های قطعات معیوب استفاده می‌کردیم، به طور واضح اطلاعات ارزشمندی در مورد طول عمر کل مجموعه را از دست می‌دادیم و دیدگاهی بدبینانه نسبت به قابلیت اطمینان قطعه به دست می‌آوردیم.
نموداری با استفاده از نرم‌افزار Weibull-DR21 در شکل ۱.۱۰ نشان داده شده است.
همانطور که می‌بینیم نتایج به دست آمده عبارتند از مقدار β برابر با ۵.۸ و γ برابر با ۶۲۲- ساعت. این نتایج نشان دهنده پدیده‌ی شناخته شدهٔ «طول عمر مفید»[31] است. این پدیده به این معنی است که احتمال دارد برخی از قطعات قبل از اینکه وارد سرویس شوند دچار خرابی شده باشند، در حالی که عمر مفید باقی‌مانده آن‌ها نیز کوتاه‌تر شده است. این اتفاق می‌تواند برای اجزای لاستیکی که به درستی نگهداری نشده‌اند، یا رنگ‌ها، چسب‌ها و باتری‌ها رخ دهد.
مقدار η برابر با ۱۷۶۰ ساعت است.

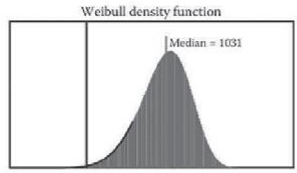
جدول ۱/۱

دادهٔ عمر به همراه تعلیق‌ها

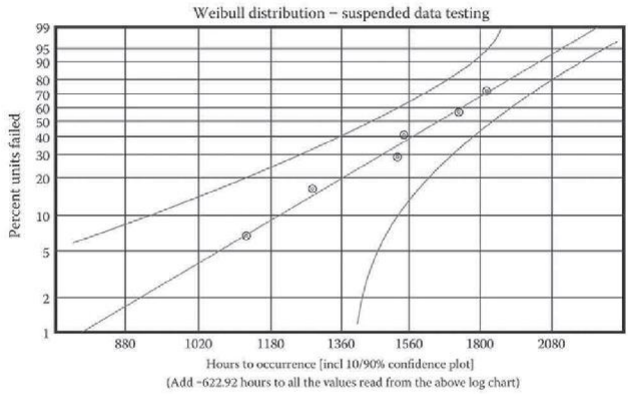
آیتم	عمر (ساعت)	خرابی (F) یا تعلیق (S)
A	500	F
B	660	F
C	800	S
D	820	S
E	900	F
F	920	F
G	940	S
H	1,100	F
I	1,200	F
J	1,400	S

[30] Prof W. Weibull
[31] shelf life

Weibull-ease™ Weibull distribution summary report



Mode name = Suspended data
Type units = Hours
Data points = 6
Units exposed = 10
Shape, β = 5.882
Scale, η = 1760
γ, offset = −622.92
Mean (MTTF) = 1008.20
Correlation = 0.99156



R%	F%	90% Conf	* 50% Conf	10% Conf
99	1	−169.93	182.27	778.50
98	2	−55.52	283.76	795.61
95	5	131.89	439.38	840.55
90	10	302.05	577.67	901.91
80	20	498.62	741.03	998.77
70	30	629.26	854.24	1079
60	40	732.32	947.26	1152
50	50	821.22	1031	1221
40	60	902.78	1111	1292
30	70	981.67	1194	1369
20	80	1062	1286	1459
10	90	1152	1405	1585
5	95	1205	1498	1690
2	98	1242	1597	1807
1	99	1256	1659	1883

Date 01-20-2014
Time 19:10

Signed _____

FIGURE 1.10 Weibull plot.

شکل ۱.۱۰: نمودار ویبول

نمونه ۱.۲: پوشش محافظ پره توربین گازی

یکی از نکات مهم در مورد تحلیل ویبول این است که نتایج آن به هیچ وجه نمی‌توانند از دانش مهندسی کارشناس در مورد مسئلهٔ موردنظر جدا باشند. مثال زیر نحوهٔ انجام این کار را نشان می‌دهد.

یک پوشش محافظ برای پره‌های توربین گازی تحت شرایط عملیاتی استاندارد مورد تست عمر قرار گرفت. ده پره به طور تصادفی انتخاب شده و برای تست عمر مورد استفاده قرار گرفتند. ساعات کارکرد تا خرابی آن‌ها در جدول ۱.۲ ثبت شد. دو عدد از پوشش‌های محافظ در زمان پایان تست در ۵۰۰۰ ساعت دچار خرابی نشده بودند. این موارد تعلیق انتهای تست هستند و باید در داده‌ها گنجانده شوند؛ در غیر این صورت، میانگین زمان تا خرابی یا MTTF تیغه‌ها به شکل بدبینانه‌ای تخمین زده می‌شود. همچنین داده‌ها باید از کمترین تا بیشترین مقدار رتبه‌بندی شوند، اما نرم‌افزار به طور خودکار این کار را انجام خواهد داد.

جدول ۱٫۲
دادهٔ عمر پوشش محافظ

شماره پوشش محافظ	ساعات باقیمانده تا خرابی پوشش
1	3,200
2	4,700
3	1,800
4	2,400
5	3,900
6	2,800
7	4,400
8	3,600
9 (Not Failed)	5,000
10 (Not Failed)	5,000

زمانی که این نقاط داده[32] در نرم‌افزار وارد شدند، نتایج به شرح زیر حاصل شد. خروجی نرم‌افزار Weibull-Ease در اینجا نشان داده نشده است:

β = ۳.۲

η = ۴۴۵۰ ساعت

γ = ۰

MTTF = ۳۹۸۵

ضریب همبستگی = ۰.۹۸۵

از این چه می‌آموزیم؟

[32] Data Points

- با توجه به مقدار بالای بتا(β) می‌توان نتیجه گرفت که خرابی ناشی از سایش و فرسودگی است. این نتیجه مطلوب و قابل پیش‌بینی است. اگر مقدار β برابر با ۱ یا کمتر بود، نگران کننده می‌شد؛ اما در این حالت انتظار می‌رود چنین پوششی به مرور زمان دچار سایش شود و این اتفاق هم افتاده است.
- همبستگی با عدد ۰.۹۸۵ بسیار بالا است، که به ما اطمینان از مقدار β به دست آمده را می‌دهد.
- با این حال، گاما γ صفر است، به این معنی که احتمال کمی برای خرابی بلافاصله پس از راه‌اندازی وجود دارد.
- عمر متوسط پوشش‌های محافظ پره‌های توربین گازی ۴۴۵۰ ساعت است

حالا، آیا این خبر خوبی است یا بد؟ بستگی دارد. اگر برای موتور هواپیمای مسافربری باشد، نتایج به اندازه کافی خوب نیستند. این پوشش برای محافظت از پره در نظر گرفته شده است، و در حالی که هیچ اطلاعاتی در مورد عمر پره پس از آسیب به پوشش نداریم، احتمالاً خرابی پوشش محافظ پس از مدت زمان بسیار کوتاهی قابل قبول نیست. با این حال، اگر این پره‌ها برای موتور موشک کروز باشند، احتمالاً پارامترها به اندازهٔ کافی خوب هستند. موتور موشک کروز فقط باید برای ساعات کمی کار کند؛ شاید تا چهار ساعت. از طرف دیگر، برای یک توربین زمین‌پایه، ما هم‌چنان نیاز به اطلاعات بیشتری در مورد عملکرد آن داریم. بنابراین می‌بینیم که قبل از اینکه بتوانیم نتایج را خوب یا بد تفسیر کنیم، باید نتایج تحلیل ویبول را با دانش خود در مورد فناوری ترکیب کنیم.

مشکلات ویبول

جدول ۱.۳ را بررسی کنید.

نمودار ویبول برای داده‌های جدول ۱.۳ در شکل ۱.۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، مقدار β تقریباً ۱.۴ است و همبستگی بیش از ۰.۹۳ به نظر بسیار خوب می‌رسد. اما همانطور که پیشتر تاکید کردیم، نمی‌توان تحلیل ویبول را از اصول مهندسی جدا کرد. در واقع، سه خرابی اول از یک توزیع و بقیه از توزیع دیگری هستند. بررسی بصری نمودار Weibull-Ease باید باعث شک تحلیل‌گر شود؛ زیرا داده‌ها به هیچ وجه معنای تک‌خطی و تک‌بعدی و روشنی ندارند. اگر داده‌ها را به عنوان توزیع های جداگانه جدا کنیم، نتایج زیر را به دست می آوریم:

جدول ۱/۳

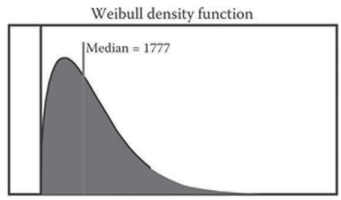
داده‌های خرابی (ترکیب حالات خرابی)

شماره سریال	زمان (ساعت)	خرابی (F) یا تعلیق (S)	تعداد
1	800	F	1
2	1,100	F	1
3	1,300	F	1
4	1,400	F	1
5	1,410	F	1
6	1,420	F	1
7	1,500	S	13

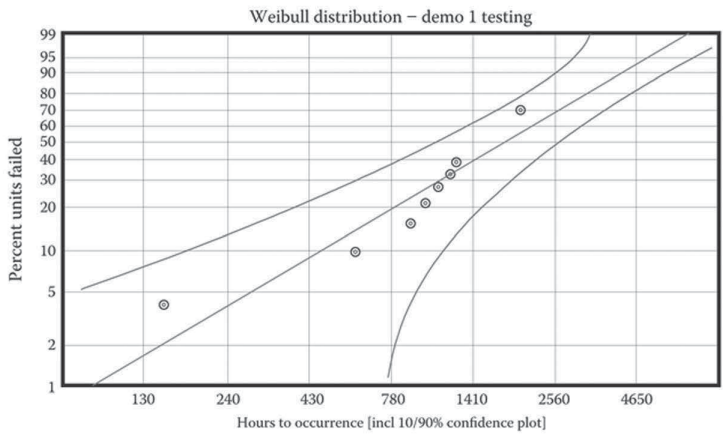
دانشجویان باید خودشان دو توزیع را در جداول ۱.۴ و ۱.۵ رسم کنند و متوجه شوند که:

- برای حالت خرابی ۱، β = 3.933، با همبستگی بالایی برابر با 0.99546 است.
- برای حالت خرابی ۲، β = 1021 و همبستگی 0.98583 است.

Weibull-ease™ Weibull distribution summary report



Mode name = Demo 1
Type units = Hours
Data points = 8
Units exposed = 17
Shape, β = 1.412
Scale, η = 2303
γ, offset = n/a
Mean (MTTF) = 2096.16
Correlation = 0.93658



R%	F%	90% Conf	* 50% Conf	10% Conf
99	1	9.75	88.68	753.55
98	2	24.62	145.39	802.30
95	5	78.81	281.22	937.13
90	10	179.36	468.14	1140
80	20	390.39	796.39	1511
70	30	609.74	1110	1874
60	40	840.92	1432	2250
50	50	1090	1777	2660
40	60	1366	2165	3129
30	70	1683	2627	3699
20	80	2067	3226	4465
10	90	2579	4157	5726
5	95	2933	5009	6963
2	98	3213	6050	8583
1	99	3325	6791	9788

Date 02-12-2014
Time 08:23

Signed _____

شکل ۱.۱۱: نمودار دو حالت خرابی

با توجه به این نتایج، دو حالت خرابی مجزا وجود دارد:
توزیع ۱ نشان‌دهنده خرابی از نوع خرابی سایش است که سایر موارد آن را تجربه نکرده‌اند. نیاز به بررسی بیشتر برای درک علت این نوع خرابی است.

توزیع ۲ نشان‌دهنده خراب شدن تقریباً همزمان سه مورد است، که احتمالاً به دلیل اضافه بار رخ می‌دهد. سیزده مورد دیگر که در حال حاضر سالم هستند، در ۱۵۰۰ ساعتی که داده‌ها جمع آوری شده‌اند، دچار خرابی نشده‌اند، اما اگر اضافه بار علت خرابی باشد، ممکن است به زودی خراب شوند. برای شناسایی حالت خرابی و پیش بینی خرابی‌های احتمالی قریب الوقوع، لازم است هر دو مورد خراب شده و نشده مورد بررسی قرار گیرند.

جدول ۱/۴

حالت خرابی ۱

شماره خرابی	زمان (ساعت)	خرابی (F) یا تعلیق (S)	تعداد
1	800	F	1
2	1,100	F	1
3	1,300	F	1

جدول ۱/۵

حالت خرابی ۲

شماره خرابی	زمان (ساعت)	خرابی (F) یا تعلیق (S)	تعداد
4	1,400	F	1
5	1,410	F	1
6	1,420	F	1
7	1,500	S	13

احتیاط‌های مربوط به ویبول

همان‌طور که دیدید، در اجرای روش ویبول مشکلاتی وجود دارد که یک تحلیل‌گر باید از آن‌ها آگاه باشد. این موارد عبارتند از:

- **نمودارهای منحنی:** این نمودارها ممکن است به دلیل رسم بیش از یک حالت خرابی ایجاد شوند.
- **نمودارهای منحنی ناشی از مقادیر غیرصفر γ:** پارامتر γ (گاما) در توزیع ویبول نشان‌دهنده موقعیت است. اگر این مقدار غیرصفر باشد، می‌تواند منجر به خلق نمودارهای منحنی شود.
- **کاربرد ویبول فقط برای قطعات:** از روش ویبول تنها می‌توان برای اجزایی استفاده کرد که تعویض می‌شوند. (البته استثناهایی برای این قاعده وجود دارد که برای این سطح مناسب نیستند.) سیستم‌های تحت نگهداشت به طور کلی برای تحلیل ویبول مناسب نیستند، مگر اینکه همیشه پس از تعمیر، همان حالت خرابی را نشان دهند.

استفاده از روش ویبول با داده‌های اندک

هنگامی که داده‌ها کمیاب هستند، می‌توان به کتابخانه ویبول مراجعه کرد. چندین مورد از این کتابخانه‌ها در اینترنت منتشر شده‌اند. لیست جزئی از چنین کتابخانه‌ای در جدول ۱.۶ ارائه شده است. همان‌طور که در این لیست مشاهده می‌شود، مقادیر β ممکن است به طور غیرمنتظره‌ای پایین باشند. به عنوان مثال، همه بلبرینگ‌ها دارای مقادیر β کمتر از ۲ هستند. به صورت نظری، بلبرینگ‌ها به دلیل سایش خراب می‌شوند و بنابراین باید مقادیر β آنها بیشتر از ۲ باشد. بنابراین، همیشه در عمل، نتایج با تئوری مطابقت ندارند.

جدول ۱٫۶ لیست قطعات از یک کتابخانه ویبول

آیتم	β Values			η Values		
	فاکتور شکل ویبول			مشخصه‌های عمر و ساعت ویبول		
	حد معمول	حد بالا	حد پایین	حد معمول	حد بالا	
قطعات						
بلبرینگ‌ها	0.7	1.3	3.5	14,000	40,000	250,000
بلبرینگ‌های غلتشی	0.7	1.3	3.5	9,000	50,000	125,000
بلبرینگ‌های لغزشی (بوشی)	0.7	1	3	10,000	50,000	143,000
تسمه‌ها	0.5	1.2	2.8	9,000	30,000	91,000
هیدرولیک	0.5	1.3	3	14,000	50,000	100,000
پیچ‌ها	0.5	3	10	125,000	300,000	100,000,000

دانستن مقدار بتا (β) به ما امکان انجام انواع پیش بینی‌ها را می‌دهد. به عنوان مثال، به نمونه «طراحی/برنامه‌ریزی آزمون» در نرم افزار Weibull-DR21 توجه کنید. در این مثال، با دانستن اینکه مقدار β از آزمایشات قبلی ۲ و میانگین زمان بین خرابی یا MTTF ۱۰۰۰ ساعت است، می‌توانیم آزمونی را همانطور که در مثال مشخص شده طراحی کنیم. برای پنج مورد جدید که در تست قرار داده می‌شوند و هیچ خرابی مجاز نیست، مدت زمان تست باید چقدر باشد؟

پاسخ ۷۶۶ ساعت است، که به این معنی است که با احتمال ۹۰%، نمونه‌ای که این آزمون را با موفقیت پشت سر می‌گذارد، از جمعیتی با میانگین MTTFای حداقل ۱۰۰۰ ساعت نشأت می‌گیرد.

تکالیف

تمرین ۱.۱: آشنایی با روش ویبول

نرم افزار Weibull-DR21 را دانلود کنید و با آن آشنا شوید. مثال‌های زیر را با دقت بررسی کنید و مطمئن شوید که تکنیک‌ها را درک کرده‌اید و در صورت نیاز قادر به بحث در مورد آن‌ها هستید:

- دموی ویبول
- برنامه‌ریزی طراحی تست
- محاسبات بلبرینگ

تمرین ۱.۲: مسئله ویبول

این داده‌ها را در نرم‌افزار ویبول خود وارد کنید (همه داده‌ها بر حسب ساعت هستند): ۱۵۰، ۱۹۰، ۲۲۰، ۲۷۵، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۲۵، ۴۷۵. مقدار β را یادداشت کنید. حالا دکمه Calculate Offset را فشار دهید. توجه کنید که با وجود دوره عملکرد بدون خرابی[33] (FFOP) و مقدار β پایین‌تر، شکل توزیع چگونه تغییر می‌کند. مفهوم FFOP را توضیح دهید. توصیف کنید که چگونه FFOP را می‌توان بدون انجام این محاسبه توسط نرم‌افزار، فقط با بررسی نمودار تخمین زد.

تمرین ۱.۳: مساله‌ای دیگر در ویبول

داده‌های زیر را در نرم‌افزار ویبول خود وارد کنید (همه ارقام بر حسب ساعت هستند): ۷۰، ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۶۵، ۲۰۰، ۲۱۰. مقدار β را یادداشت کنید و دوباره ببینید که چگونه تابع Offset مقدار β را تغییر می‌دهد، و همچنین توجه کنید که حالا Offset منفی شده است. معنی این چیست؟

تمرین ۱.۴: طراحی فنر

دو مجموعه داده زیر را بررسی کنید که مربوط به دو طرح مختلف برای یک فنر خاص هستند (جدول ۱.۷).

با استفاده از نرم‌افزار تحلیل ویبول خود، پارامترهای ویبول را محاسبه کنید. همچنین ببینید که قابلیت اطمینان برای هر دو مجموعه داده در ۴۰۰ هزار دور (عدد ۵۰%) چقدر است. و بر این اساس، کدام طرح بهتر است؟

[33] failure-free operating period

اگر نیاز به درصد خرابی کمتر از ۱ درصد با اطمینان ۹۰ درصددارید، و میانگین استفاده از فنر ۸۰۰۰ دور در سال باشد، چه مدت گارانتی ممکن است مناسب باشد.

تمرین ۱.۵: تحلیل ویبول بلبرینگ‌های غلتشی

از لحاظ نظری، بلبرینگ‌های غلتشی باید دچار سایش شوند و از این رو باید مقادیر β بالایی در حدود ۲ و بالاتر داشته باشند. با این حال، هنگامی که پایگاه‌های داده موجود در اینترنت و کتاب‌های درسی را مطالعه می‌کنید، معمولاً مقادیر β پایینی در حدود ۱.۳ برای بلبرینگ‌ها ذکر شده است. این پدیده را بررسی کنید و یافته‌های خود را در یک گزارش کوتاه بنویسید.

گزارش شما باید شامل موارد زیر باشد، اما محدود به آنها نیست:

- صفحه عنوان و نویسنده
- بیانیه اصالت اثر
- خلاصه
- فهرست مطالب
- فهرست شکل‌ها
- فهرست جداول
- مقدمه
- تاریخچه فناوری
- مقادیر تئوری ویبول برای بلبرینگ‌های غلتشی
- مقادیر واقعی ویبول برای بلبرینگ‌های غلتشی
- بحث درباره دلایل مقادیر پایین β
- پیوست‌ها:

۱. منابع
۲. سایر موارد (در صورت لزوم)

طراحی A

شماره	دوره خرابی
1	726,044
2	615,432
3	807,863
4	755,000
5	508,000
6	848,953
7	384,558
8	666,600
9	555,201
10	483,337

طراحی B

شماره	دوره خرابی
1	529,082
2	729,000
3	650,000
4	445,834
5	343,280
6	959,900
7	730,049
8	973,224
9	258,006
10	730,008

تمرین ۱.۶: کارخانه کودسازی New Era

مورد ۱.۱ را که در ادامه آمده است، کامل کنید.

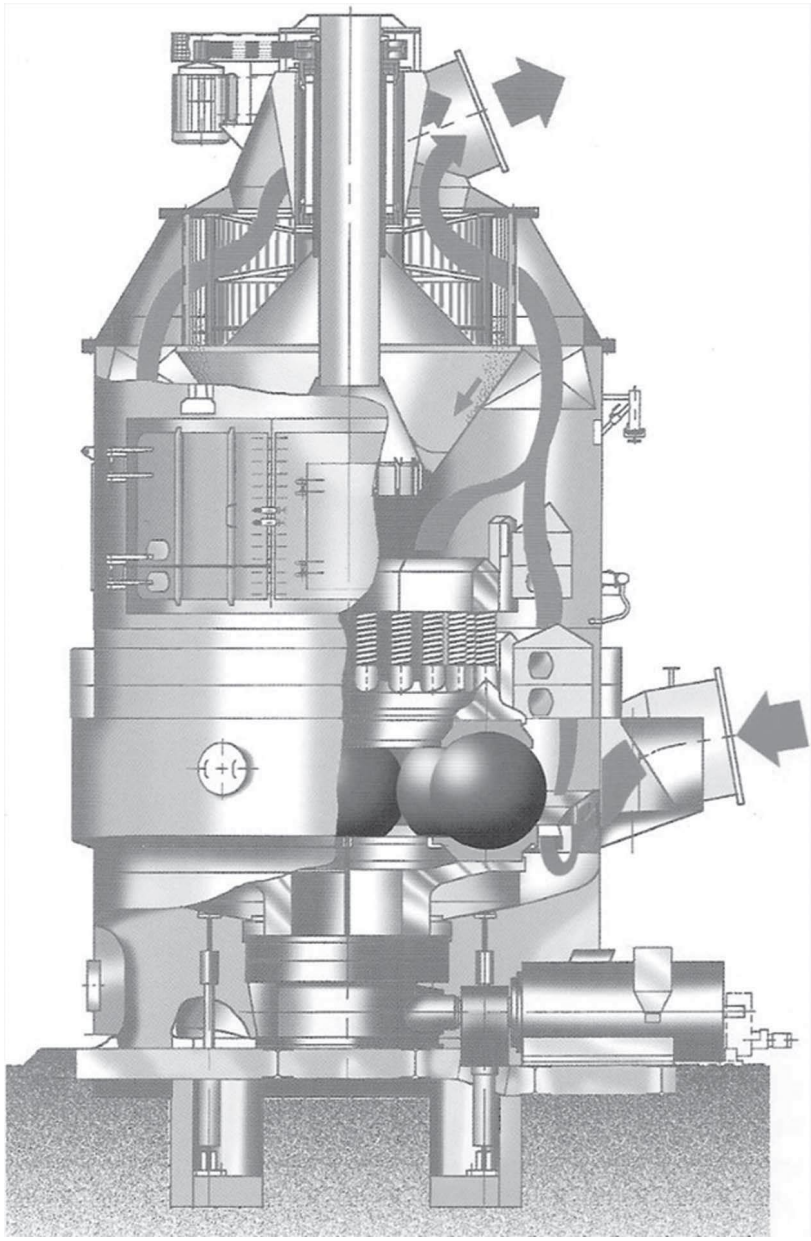
مورد ۱.۱: تحلیل ویبول در کارخانه کودسازی New Era

یادداشت نویسنده: در اینجا نمونه‌ای آورده شده است که نشان می‌دهد چگونه تحلیل ویبول می‌تواند به عنوان کمکی برای تحقیق در مورد علت اصلی خرابی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، مطالعه دقیق اعداد حتی بدون استفاده از تحلیل ویبول، منجر به تصمیم گیری درست می‌شود.

مارک فرانسیس[34]، مشاور نگهداری و تعمیرات، برای کمک به نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان یا RCM در آسیاب زغال سنگ کارخانه کودسازی New Era فراخوانده شده بود. این آسیاب یک ماشین آسیاب اسپیندل عمودی بود که قادر بود زغال سنگ را با سرعت ۷۰ تن در ساعت به پودر نرم تبدیل کند. مقطعی از یک ماشین آسیاب مشابه، اما از سازنده دیگری، در شکل ۱.۱۲ نشان داده شده است.
بیشتر اجزای ماشین آسیاب عمر طولانی داشتند و تنها در معرض سایش آسیاب زغال سنگ در دوره‌های هزاران و ده‌ها هزار ساعت قرار می‌گرفتند. اما مجموعه‌ای از قطعات به طور خاص مشکل‌ساز بودند. این مجموعه، مجموعه‌ای از دمنده‌های لاستیکی[35] بود که به حرکت جک‌های هیدرولیک اجازه می‌داد تا فشار را به میز بارگذاری بالایی وارد کنند تا زغال سنگ آسیاب شود. (این دمنده‌ها در شکل ۱.۱۲ قابل مشاهده نیستند.)

قسمت داخلی آسیاب شبیه یک توپ بزرگ بود که زغال سنگ به داخل سوراخ مسیر یا میز بارگیری بالایی ریخته می‌شد و در حالی که توسط نیروی گریز از مرکز به لبه بیرونی مسیر یا میز پایینی در حین چرخش منتقل می‌شد، توسط توپ‌ها آسیاب می‌شد. میز بالایی نمی‌چرخید و توسط جک‌های هیدرولیک، که از طریق اهرم‌ها عمل می‌کردند، بارگذاری می‌شد، همانطور که در شکل ۱.۱۳ نشان داده شده است. داخل آسیاب به فشار تقریباً ۱ اتمسفر (atm) برای خارج کردن زغال سنگ آسیاب شده از آسیاب، تحت فشار قرار داده می‌شد. دمای داخلی آسیاب تقریباً ۱۰۰ درجه سانتیگراد بود تا به خشک شدن زغال سنگ کمک کند. سپس از زغال سنگ پودر شده در ساخت آمونیاک استفاده می‌شد که آن هم در ساخت کود به کار می‌رفت.

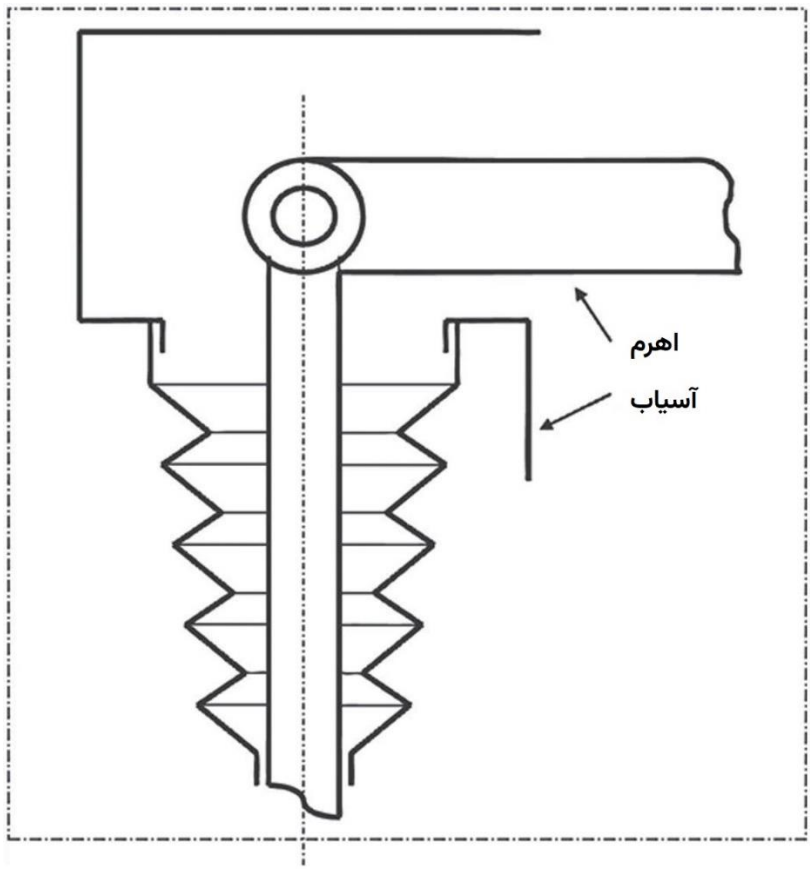
[34] Mark Francis
[35] rubber bellows



شکل ۱.۱۲: ماشین آسیاب اسپیندل عمودی

دمنده‌های لاستیکی در معرض فشار و دمای نسبتاً سختی قرار داشتند. این دمنده‌ها باید به حرکت جک‌ها و حفظ فشار هوای داخل آسیاب کمک کنند. هشت جک به صورت محیطی در اطراف محفظه استوانه‌ای بیرونی آسیاب چیده شده بودند. دمنده‌ها از پیکربندی درخت مانند با هشت چین و قطرهای بالایی و پایینی به ترتیب تقریباً ۱۲۵ و ۲۵۰ میلی متر بودند. قطر بالایی به یک شیر خروجی روی محفظه آسیاب و قطر پایینی به میله فشار جک هیدرولیک متصل می‌شد. دمنده‌ها در بالا و پایین توسط گیره‌های شلنگ بزرگ، مشابه گیره‌های مورد استفاده در شیلنگ‌های رادیاتور خودرو، محکم می‌شدند. مقطعی از یکی از دمنده‌ها در شکل ۱.۱۳ نشان داده شده است.

خرابی یک دمنده با یک ترک محیطی در پایه چین‌ها رخ می داد. هنگامی که یک دمنده خراب می‌شد، آسیاب باید بلافاصله خاموش می‌شد، زیرا غبار زغال سنگ داغ به مقدار زیادی از ترک بیرون می‌زد.



شکل ۱.۱۳: مقطعی جزئی از یکی از دمنده‌ها

پیتر نوبل سرپرست نگهداری و تعمیرات کارخانه‌ای بود که ماشین آسیاب زغال سنگ زیر نظر او دچار حادثه شد. او در پاسخ به سوال مارک گفت: «تا به حال، هر زمانی که دمنده خراب می‌شد، کل مجموعه را تعویض می‌کردیم».

مارک پرسید: «فکر می‌کنی این سیاست درستی است؟ تعویض کل مجموعه به جای یک دمنده خراب؟»

پیتر با عصبانیت فریاد زد: «مرد حسابی، من دیگه نمی‌خواهم با دمنده‌ها بیشتر از این مشکل داشته باشم!»

مارک فواصل جایگزینی دمنده‌ها را در دفترچه ثبت عملکرد بررسی کرد. سه چرخه تعویض آخر به طور دقیق ثبت شده بود: همه دمنده‌ها در زمان‌های زیر پس از خرابی یکی از آن‌ها تعویض شده بودند: ۶۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰۰ ساعت. آخرین تعویض به تازگی انجام شده بود و ماشین آسیاب ظرف چند ساعت به کار خود بازگشته بود.

تمرین

داده‌های خرابی را با استفاده از تحلیل ویبول بررسی کنید. فکر می‌کنید مارک چه توصیه‌هایی باید انجام دهد و چه قید و شرط‌هایی باید این توصیه‌ها را همراهی کند؟ دوم، این تمرین چه چیزی را در مورد قدرت و کارآیی روش ویبول نشان داده است؟

تمرین ۱.۷: تاریخچه عمر یک سدان هیلمن ووگ
مثال ۱.۲ را تکمیل کنید.

این پرونده چیزی را فاش می‌کند که اکثر کتاب‌های درسی آن را نادیده می‌گیرند! آن چیست؟

این خودرو مدل ۱۹۷۶ (شکل ۱.۱۴) درست در انتهای عمر تولید این مدل ساخته شد. این خودرو از برخی جهات یک مدل ویژه استفاده از قطعات یدکی بود که در آن از قطعات سایر مدل‌ها، به عنوان مثال سیستم کلاچ و اگزوز استفاده شده بود. قابلیت اطمینان این مدل در سطح مدل ۱۹۷۲ که قبلا مالکیت آن را بر عهده داشت، نبود. داده‌های مربوط به خرابی‌ها در طول ۱۷ سال عمر مفید خودرو به طور نسبتاً دقیقی حفظ شد که نتایج آن در ادامه آمده است.

تمام تعمیرات به جز موارد ذکر شده توسط مالک انجام شده است. دو نکته قابل توجه به شرح زیر است:

- آن روزها خودروها به اندازه‌ای ساده بودند که تعمیر آن توسط مالک خودرو می‌توانست یک گزینهٔ منطقی باشد.
- تورم در اقتصاد آفریقای جنوبی در دهه ۱۹۷۰ وحشتناک بوده است!

جدول ۱.۸ سوابق کامل تعمیر خودرو را به استثنای سرویس‌های معمول مانند تعویض شمع نشان می‌دهد.

شکل ۱.۱۴: خودرو سدان هیلمن مدل ووگ

کیلومتر	تعمیرات
۴۲٬۳۰۰	تعویض کلاچ
۴۷٬۰۰۰	انداختن یک لاستیک نو
۵۰٬۰۰۰	تنظیم چرخ‌ها
۶۲٬۰۰۰	کیت سیلندر اصلی کلاچ، انداختن یک لاستیک نو
۶۲٬۰۰۰	تنظیم موقعیت چرخ جلو سمت چپ
۶۴٬۳۵۰	تنظیم چرخ، تنظیم فاصله سوپاپ
۶۶٬۵۰۰	تعویض دو لاستیک جلو به لاستیک‌های نو
۷۵٬۰۰۰	سیستم اگزوز اصلی MS را با سیستم SS جایگزین کنید، تمیزکاری دینام
۸۰٬۰۰۰	تعویض دینام
۸۷٬۰۰۰	نوسازی سیستم کلاچ و نوسازی سیلندر ترمز
۸۸٬۰۰۰	تعویض بلبرینگ چرخ جلو، تعویض لنت ترمز و کفشک ترمز عقب
۸۹٬۵۰۰	نوسازی پمپ بنزین، تمیز کردن فیلتر کاربراتور، تعویض درپوش دلکو
۸۹٬۵۰۰	نصب فیلتر سوخت
۹۱٬۰۰۰	تنظیم سوپاپ‌ها، تعویض کابل گاز و تعویض واترپمپ
۹۷٬۰۰۰	تمیز کردن ژیگلور کاربراتور
۱۱۱٬۵۰۰	بازسازی دیفرانسیل
۱۱۶٬۰۰۰	تعویض لنت ترمز دیسکی جلو
۱۲۰٬۰۰۰	تعمیر روکش صندلی
۱۲۴٬۰۰۰	پمپ سوخت جدید
۱۲۵٬۰۰۰	باتری جدید، چهار لاستیک نو
۱۲۶٬۰۰۰	تعویض پمپ آب
۱۳۵٬۰۰۰	تعویض شیشه جلو، تعویض لاستیک درپوش صندوق عقب
۱۳۵٬۵۰۰	تعویض بلبرینگ چرخ
۱۳۶٬۰۰۰	صافکاری، یک لاستیک نو
۱۴۰٬۵۰۰	سرسیلندر جدید
۱۴۰٬۹۰۰	صفحه کلاچ جدید، بازسازی موتور
۱۴۵٬۰۰۰	تعویض جلوبندی
۱۴۹٬۰۰۰	دو لاستیک نو، تعویض میل گاردان
۱۵۵٬۰۰۰	رادیاتور جدید، فن جدید
۱۶۰٬۰۰۰	تعمیر سیستم برقی
۱۶۵٬۰۰۰	کفشک ترمز عقب جدید، تعویض استارت
۱۷۰٬۰۰۰	سوخته شدن سرسیلندر - خودرو به عنوان ماشین اوراقی فروخته شد

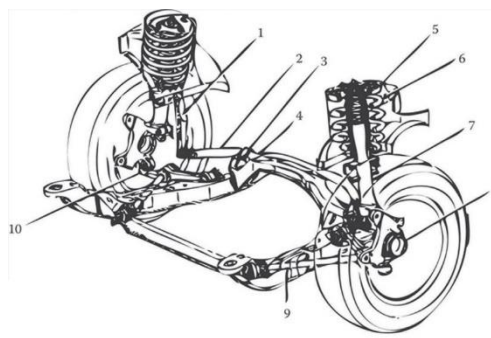
در ابتدا، خودرو به مدت تقریباً ۳.۵ سال و طی مسافت ۴۰،۰۰۰ کیلومتر بدون خرابی کار کرد. سپس دچار خرابی زودرس کلاچ شد. پس از آن، خرابی‌های جزئی یا سرویس‌های دوره‌ای به شکل نسبتاً پراکنده‌ای در طول بیشتر عمر خودرو رخ داد. با این حال، دسته‌هایی از خرابی‌ها را نیز مشاهده می‌کنیم، مانند مواردی که بین ۶۰،۰۰۰ تا ۷۰،۰۰۰ کیلومتر رخ داد.

در این مورد خاص، خودرو از روی یک چاله (که در آن روزها در جاده‌های آفریقای جنوبی نادر بود و رانندگان آنقدر نسبت به چنین مواردی هوشیار نبودند که امروزه هستند) عبور کرده بود. این حادثه باعث خم شدن لبه چرخ، ترکیدن لاستیک و خم شدن زیرمجموعه و سیستم تعلیق مک فرسون، که در شکل ۱.۱۵ نشان داده شده است، شد. لبه چرخ با چکش ۴ پوندی صاف شد. سیستم تعلیق با بریدن ۱۵ میلی‌متر از بلوک لاستیکی لنگر اتصال دهنده بازو تعمیر شد. سپس چرخ‌ها توسط یک متخصص تنظیم مجدد شدند.

نمودار خطی اقدامات اصلاحی

شکل ۱۶.۱ نموداری خطی از اقدامات اصلاحی بر روی یک مقیاس زمانی را نشان می‌دهد. این نمودار گاهی اوقات «طرح آشر» نیز نامیده می‌شود. با بررسی این شکل، دورهٔ بدون خرابی بیش از ۴۰،۰۰۰ کیلومتر را مشاهده می‌کنیم، و سپس خرابی‌هایی که تا زمان خروج از بهره‌برداری تقریباً تصادفی هستند. هیچ فاز سومی برای منحنی وان (شکل منحنی خرابی که شبیه وان است) آشکار نیست. بنابراین، چه اتفاقی در حال رخ دادن است و چه چیزی باعث خروج خودرو از وضعیت بهره‌برداری شده است؟

تعمیر اساسی حرفه‌ای موتور در ۱۴۰،۵۰۰ کیلومتری پس از سوختن واشر سرسیلندر انجام شد. تعمیرات بعدی شامل یک میل گاردان جدید در ۱۴۹،۰۰۰ کیلومتری و یک رادیاتور و فن جدید بود که به دلیل جدا شدن فن قدیمی و خرابی رادیاتور ضروری شد. این کار در ۱۵۵،۰۰۰ کیلومتری انجام شد. تعمیر بعدی مربوط به سلونوئید استارت در ۱۶۰،۰۰۰ کیلومتری و سپس تعویض کامل استارت در ۱۶۵،۰۰۰ کیلومتری بود. طول عمرها در جدول ۱.۹ آمده است.



شکل ۱.۱۵: سیستم تعلیق جلوی مک فرسون و زیرمجموعهٔ آن

FIGURE 1.16 Linear plot of corrective actions: Scale in kilometers × 1,000.

شکل ۱.۱۶: نمودار خطی اقدامات اصلاحی: مقیاس در کیلومتر × ۱۰۰۰

سرانجام، سرسیلندر جدیدی که در ۱۴۰,۵۰۰ کیلومتری نصب شده بود، در ۱۷۰,۰۰۰ کیلومتری سوخت. این همراه با پاره شدن شلنگ رادیاتور بود. اینکه آیا ابتدا شلنگ پاره شده و منجر به کمبود آب شده است، که منجر به داغ شدن بیش از حد شده است، که به نوبه خود منجر به خرابی واشر شده است، یا اینکه آیا واشر سرسیلندر ابتدا خراب شده است، مشخص نیست. به دلیل پیش‌بینی هزینه بالای تعمیر، که به دنبال تعمیر قبلی در گذشته حس می‌شد، تصمیم بر از رده خارج کردن خودرو گرفته شد.

قطعه	عمر (کیلومتر)	عمر مدل مشابه ۱۹۷۲
صفحه کلاچ	۹۸۶۰۰; ۴۲۰۰۰	۱۲۰,۰۰۰
بلبرینگ چرخ	۸۸,۰۰۰; ۴۷,۰۰۰	۱۱۰,۰۰۰
لنت ترمز	۲۸,۰۰۰	
کفشک ترمز عقب	۸۸,۰۰۰; ۷۷,۰۰۰	۱۰۷,۰۰۰
کیت سیلندر اصلی کلاچ	۶۲,۰۰۰; ۲۵,۰۰۰	
کیت سیلندر فرعی کلاچ	۸۷,۰۰۰	۱۲۹,۰۰۰
صداگیر، فولاد نرم	۳۱,۰۰۰	
صداگیر، استیل ضد زنگ	۶۷,۰۰۰	
پمپ آب	۹۱,۰۰۰	
پمپ بنزین	۸۹,۰۰۰	۳۴,۰۰۰
واشر سرسیلندر	۱۴۰,۰۰۰	۱۲۲,۰۰۰

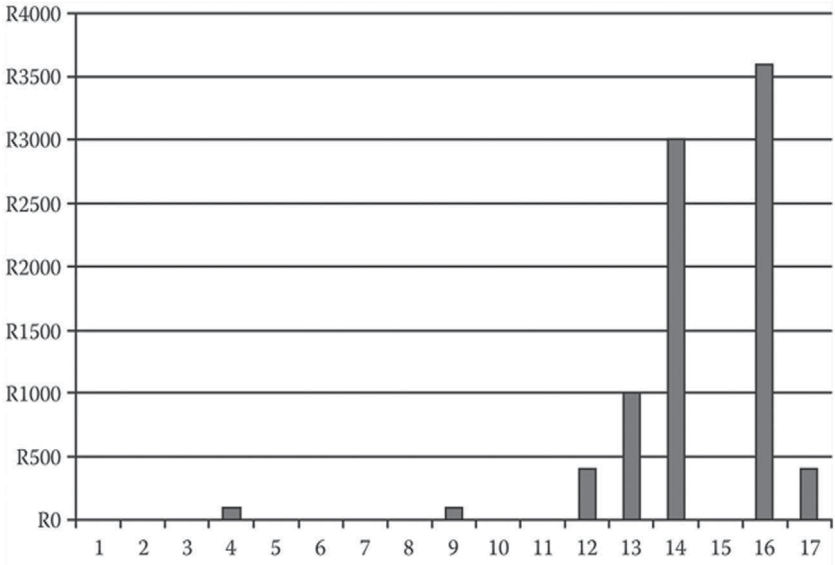


FIGURE 1.17 Major repair cost versus years of service.

شکل ۱.۱۷: هزینه تعمیرات اساسی در مقابل سال‌های کارکرد خودرو

تمرین

۱ .سوابق تعمیر و سایر اطلاعات ارائه شده قبلی را مطالعه کنید. این مورد ساده، چندین مفهوم مهندسی قابلیت اطمینان را نشان می دهد، از جمله موارد زیر:

- **مرگ و میر زودرس**
- **تعمیر ناقص :**تعمیراتی که به طور کامل مشکل را برطرف نمی کند و ممکن است منجر به خرابی‌های بعدی شود.
- **تمدید عمر:** اقداماتی برای افزایش طول عمر مفید یک محصول.
- **نشانه خرابی:** علائم و نشانه هایی که خرابی قریب الوقوع را پیش بینی می‌کنند.
- **ایمن‌سازی:** تغییراتی که برای بهبود قابلیت اطمینان یا ایمنی یک محصول انجام می‌شود.
- **بازرسی چشمی:** بازرسی فیزیکی یک محصول برای شناسایی مشکلات احتمالی.
- **اقدام پیشگیرانه یا تعویض:** تعویض یک قطعه برای جلوگیری از خرابی قطعه دیگر.
- **تحلیل علل ریشه‌ای:** شناسایی علت اصلی یک خرابی.

موارد بالا را در این مثال بیابید.

۲ .علاوه بر این، مثال قبلی را مطالعه کنید و در مورد نتایج آن نظر بدهید .چه اتفاقی برای منحنی وان کلاسیک (که در جاهای دیگر مورد بحث قرار گرفته است) افتاده است؟ چرا این منحنی در اینجا ظاهر نمی‌شود؟ آیا کتاب‌های درسی اشتباه می‌کنند؟ به طور ویژه، اهمیت شکل ۱۷.۱ چیست؟

۳ .در مورد این واقعیت نظر دهید که خودروی مدل ۱۹۷۲ که به جز برخی تغییرات جزئی در ظاهر، عملاً مشابه نسخه ۱۹۷۶ بود، بسیار قابلیت اطمینان بالاتری داشت.

سیستم تعلیق مک فرسون:

سیستم تعلیق مک فرسون یک سیستم تعلیق مستقل با ترکیبی فنر و کمک‌فنر است. این سیستم با ساختاری فشرده، سبک‌وزن و ارزان، دارای یک کمک‌فنر تلسکوپی عمودی است که به بازوی کنترلی فوقانی متصل می‌شود تا موقعیت چرخ را معین کند. این سیستم نسبت به چیدمان‌های چند اتصالی ارزان‌تر است، اما به اندازه آنها مستحکم نیست. این سیستم تعلیق در دهه ۱۹۴۰ توسط ارل اس. مک فرسون از فورد توسعه داده شد و در سال ۱۹۴۹ بر روی خودروی فرانسوی فورد وِدِت و سپس بر روی مدل‌های کنسول، زفیر و زودیاک در سری فورد انگلستان معرفی شد

www.pegaheaftab.com