

استفاده از توزیع وایبول برای محاسبه پارامترهای RAMS در زیرساخت های ریلی

نام محور مقاله: زیر بنا و تاسیسات، طراحی زیر ساخت های ریلی
ابوالفضل رحمانی^۱

چکیده

زیر ساخت های ریلی، سازه هایی با نیاز به سرمایه گذاری بسیار بالایی می باشند. این سازه ها جهت کار در شرایط ایمنی سخت طراحی می شوند و می بایست حداقل خرابی را در دوره عملکرد خود داشته باشند. از این میان خطوط راه آهن تجهیزاتی هستند که در معرض گسترش خرابی ریلی مانند موج دار شدن، ترک، شکست و... قرار می گیرند. امروزه تکنیک های قابلیت اطمینان^۲، در دسترس بودن^۳، قابلیت تعمیرات^۴ و ایمنی^۵ (RAMS) به طور گسترده ای در حوزه صنایع ریلی مورد استفاده قرار می گیرند و پتانسیل بالایی نیز برای کاربرد در حوزه مدیریت سازه های ریلی دارند. در این مقاله به مطالعه کاربرد تکنیکهای RAMS در مدیریت خطوط راه آهن و در حالت خاص ریل پرداخته شده است. روش های جمع آوری داده ها و پیش بینی روش ها مورد بحث قرار خواهد گرفت. همچنین از توزیع وایبول برای پیش بینی عباراتی برای محاسبه خرابی ها و قابلیت اطمینان استفاده می شود و از این عبارات برای به دست آوردن هزینه های ناشی از خرابی استفاده می شود.

کلمات کلیدی

قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، قابلیت تعمیرات و ایمنی (RAMS)، توزیع وایبول.

مقدمه

از ابتدای شروع دوره صنعتی شدن، مهندسين در تلاش برای ایجاد تجهیزات و سیستم های مطمئن و با دوام بوده اند. در آن زمان توسعه پروسه های طراحی معمولاً با فرآیند سعی و خطا همراه بود. با وجود بهبودهای فراوانی نیز که بعد از آن صورت

^۱ . کارشناس طراحی محصول - شرکت صنایع ریلی ایران خودرو (ایریکو)، کیلومتر ۱۴ اتوبان تهران - کرج، ورودی آزاد

Email: Design@iri.co.ir

09123829326

شهر - ساختمان سریر، طبقه ۲

^۲ Reliability

^۳ Availability

^۴ Maintainability

^۵ Safety

گرفت، تقریباً هنوز غیر ممکن است که فعالیت های انسانی در طراحی بدون عیب و نقص باشند. هزینه ها و ریسک ها مستقیماً به خرابی ها مربوط می شوند و نرخ این خرابی ها معمولاً با افزایش پیچیدگی قطعات، تجهیزات و یا سیستم ها و همچنین کاهش زمان تحویل آنها افزایش خواهد یافت. لزوم ارزیابی و پیش بینی خرابی ها و ریسکها در همان فازهای ابتدایی مرحله طراحی موجب پیدایش مفاهیم RAMS گردیده است.

در این مقاله یک روش عملی جهت محاسبه نرخ خرابی و قابلیت اطمینان در ریل، یعنی استفاده از توزیع وایبول مورد بررسی قرار می گیرد. قابلیت اطمینان، میزان دسترسی، تعمیر پذیری و ایمنی (RAMS) به عنوان ویژگی های یک سیستم تعریف شده و نشانگر کیفیت و عملکرد سیستم می باشند [۱].

نخستین استاندارد اروپایی در زمینه RAMS برای سیستم های ریلی یعنی استاندارد EN50126 در سال ۱۹۹۹ توسط CENELEC انتشار یافت که قابلیت اطمینان، میزان دسترسی، تعمیر پذیری و ایمنی را به عنوان مشخصه های سیستم با عملکرد طولانی معرفی کرد. این مشخصات در سراسر عمر سیستم با استفاده از مفاهیم مهندسی استقرار یافته، روش ها، ابزارها و تکنیک ها به دست خواهند آمد [۲].

تعریف اصطلاحات RAMS:

استاندارد EN50126 [۳] عناصر RAMS را به صورت زیر بیان می کند:

قابلیت اطمینان: احتمال اینکه یک قطعه بتواند در شرایط تعریف شده و در دوره زمانی معین کار مورد نظر را انجام دهد. در دسترس بودن: توانایی یک محصول در این که بتواند کار در نظر گرفته شده را با فرض فراهم بودن منابع خارجی مورد نیاز آن، در شرایط تعریف شده و در دوره زمانی معین انجام دهد.

قابلیت تعمیر: احتمال اینکه تعمیر یک قطعه تحت شرایط مشخص و در فاصله زمانی تعریف شده با استفاده از منابع و روش های تعیین شده انجام خواهد شد.

ایمنی: وضعیت یک مجموعه فنی بدون ریسک و آسیبهای غیر منتظره.

قابلیت اطمینان سیستم بر حسب نوع خرابی هایی که در جدول (۱) آمده است بیان می شود [۳]. به منظور دستیابی به عملکرد مورد نیاز سیستم ریلی، ابتدا حالت خرابی ریل می بایست تعریف شده و بر طبق جدول (۱) طبقه بندی شود. هدف قابلیت اطمینان بالاتر با از پیش برداشتن گروه خطای قابل توجه امکان پذیر بوده، در حالی که اهداف پایین تر با از میان برداشتن گروه خطای جزئی میسر می باشد.

همچنین تعریف برخی اصطلاحات مورد استفاده در محاسبه پارامترهای RAMS به صورت زیر می باشد:

MUT (Mean Up Time): زمان متوسط کارکرد

MDT (Mean Down Time): زمان متوسط توقف

M TBF (Mean Time Between Failure): متوسط زمان بین دو خطا

MDTF (Mean Distance To Failure): متوسط مسافت تا اولین خطا

MDBF (Mean Distance Between Failure): متوسط مسافت بین دو خطا

MTTF (Mean Time To Failure): متوسط زمان تا اولین خطا

MGT (Million Gross Tones): میلیون تناژ کلی

λ : نرخ خرابی

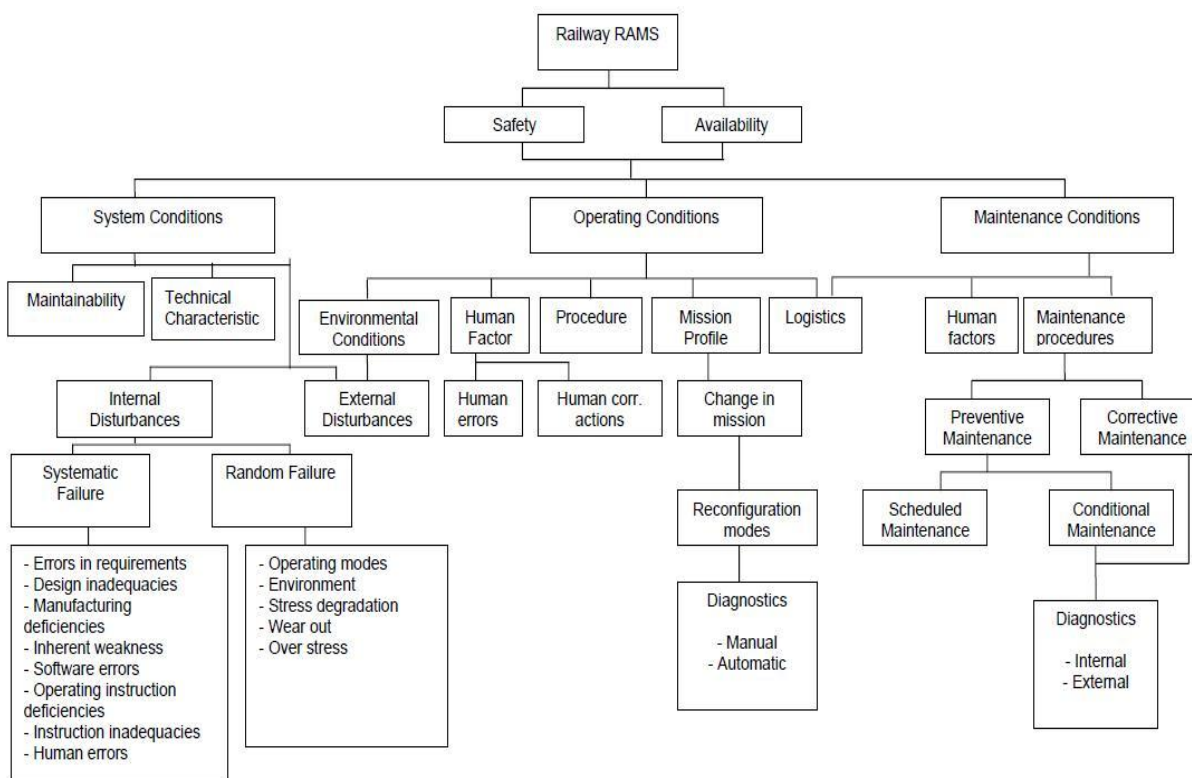
جدول (۱) - گروه خطاهای RAMS

گروه خطا	تعریف
خطای قابل توجه (خطایی که موجب توقف مجموعه می گردد)	خطایی که - مانع حرکت قطار شده و یا موجب تاخیر/هزینه ای بیش از حد مجاز تعریف شده می شود.
خطای عمده	خطایی که - می بایست از سیستم برطرف شده تا بتواند عملکرد تعریف شده خود را داشته باشد. - موجب ایجاد تاخیر / هزینه ای بیش از مقدار حدی تعریف شده نمی گردد.
خطای جزئی	خطایی که - موجب جلوگیری از رسیدن سیستم به عملکرد تعریف شده نمی گردد.

پارامترهای RAMS در سیستم ریلی از طریق سه منبع خطا تحت تاثیر قرار می گیرند [۲] :

- شرایط سیستم: خطاهایی که در داخل سیستم در هر سیکل عمر سیستم ایجاد می شوند.
- شرایط عملکردی: خطاهایی که در اثر عملکرد سیستم ایجاد می شوند.
- شرایط تعمیر: خطاهایی که در اثر اقدامات تعمیرکارانه ایجاد می شوند.

این منابع خطا می توانند با یکدیگر در ارتباط باشند شکل (۱) . همانطور که از شکل پیداست قابلیت اطمینان به صورت مستقیم نشان داده نشده است بلکه از طریق خطاهای داخلی و خارجی نمایش داده شده است. فاکتورهایی که بر روی RAMS تاثیر می گذارند و در شکل نشان داده شده اند عمومی بوده و می توانند در تمام کاربردهای صنعتی از جمله صنایع حمل و نقل ریلی به کار روند.



شکل (۱) - فاکتورهای مؤثر بر RAMS سیستم ریلی [۵]

کلیه فاکتورهایی که به طور ویژه بر پارامترهای RAMS ریل تاثیر می گذارند در جدول (۲) ذکر شده اند. به منظور ارزیابی تاثیر هر کدام از این فاکتورها بر روی RAMS ریل، ضروری است که خصوصیات فنی آنها به درستی شناسایی شود. می توان گفت پارامترهای فنی که علت پارامترهای فیزیکی نیز می باشند به طور مستقیم بر روی RAMS ریل تاثیر می گذارند هستند. شرایط سیستمی معمولا مربوط به طراحی و ساخت اجزای ریل بوده در حالی که شرایط عملکردی مربوط به عملکرد ناوگان می باشند. بیشتر اوقات تغییر شرایط سیستمی و عملکردی خط آهن مشکل می باشد در حالی که تغییر شرایط تعمیراتی کاملا ممکن می باشد [۲].

جدول (۲)- پارامترهای مؤثر بر RAMS یک سیستم ریلی

	پارامترهای فیزیکی	پارامترهای فنی
شرایط سیستمی	منحنی خط	تنش های شبه استاتیک
	شیب خط (شروع، پایان، مقدار)	تنش های شبه استاتیک
	ریل (نوع خط، مفصلی یا جوشی)	مقاومت تسلیم (مدول یانگ)
	بالاست (نوع بالاست، اندازه بالاست)	سختی، میرایی
	تراورس (نوع تراورس، فاصله تراورس)	سختی، میرایی، تنش خمشی
	بست (نوع بست)	میرایی
	قشر بستر خط (شرایط زمین شناسی)	سختی، میرایی
شرایط عملکردی	شرایط عملکردی خط:	
	بارها (MGT سالیانه، ماکزیمم بار اکسل)	تنش خمشی، تنش برشی، تنش تماسی
	محیط (دما)	تنش حرارتی
	شرایط عملکردی وسیله نقلیه:	
	سرعت قطار	تنش عمودی، تنش جانبی
	شرایط وسیله نقلیه (چرخ های تو خالی)	تنش دینامیکی
شرایط تعمیراتی	سایش	نرخ سایش
	بپ کردن حفره ها	تغییر سختی خط
	روغن کاری	تغییر ضریب اصطکاک
	نوسازی اجزای خط	فاصله زمانی نوسازی
	جایگزینی قطعات خط	نرخ خرابی اجزای خط

رابطه بین قابلیت اطمینان و نرخ خرابی:

قابلیت اطمینان، نرخ خرابی و MTBF با یکدیگر رابطه دارند [۲] به طوری که با به دست آوردن یکی میتوان دیگری را به دست آورد.

رابطه بین قابلیت اطمینان و عدم قابلیت اطمینان به صورت زیر می باشد:

رابطه بین قابلیت اطمینان و نرخ خرابی به صورت زیر می باشد:

$$R(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(t) dt]$$

رابطه بین (MTTF) $\theta(t)$ و قابلیت اطمینان به صورت زیر می باشد:

$$\theta(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

هر گاه نرخ خرابی $\lambda(t)$ ثابت فرض شود با استفاده از رابطه بین قابلیت اطمینان و نرخ خرابی می توان نوشت:

$$R(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(t) dt] = \exp[-\lambda t] = e^{-\lambda t}$$

و MTTF می تواند به صورت ساده شده زیر باشد:

$$\theta(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

توزیع نرخ خطا و توزیع منحنی وان:

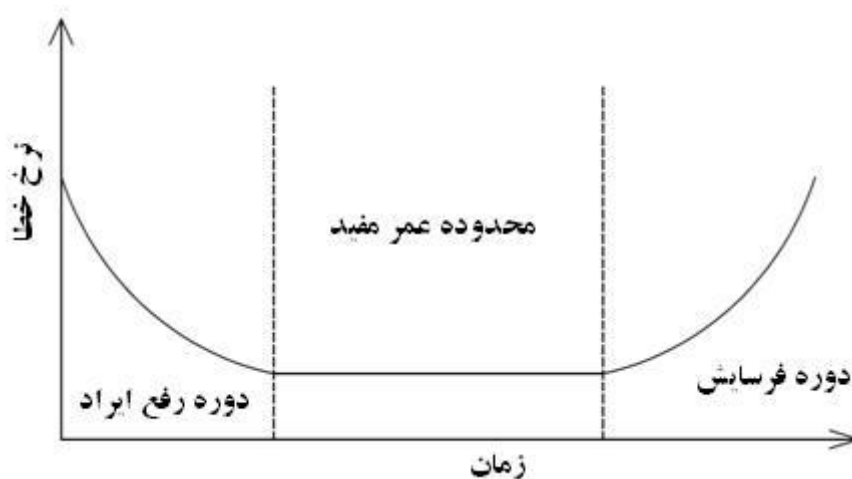
یکی از توزیع های پر کاربرد برای نرخ خرابی در بررسی پارامترهای RAMS منحنی وان Bathtube می باشد [۴] که نام خود را به سبب شکل وان مانند خود می گیرد. منحنی وان خصوصیات زیر را دارد.

ناحیه اول: در شروع آن تعداد خرابی ها به دلیل دوره تنظیم قطعات و تقابل با دیگر اجزا زیاد است و بمرور زمان نرخ خرابی کاهش می یابد. این ناحیه به عنوان دوره رفع ایراد نیز شناخته می شود.

ناحیه دوم: پس از اتمام ناحیه اول ناحیه نرخ خرابی ثابت می باشد که معنای آن این است که قطعات پس از سپری نمودن دوره خرابیهای اولیه به ناحیه ای می رسند که نرخ خرابی قطعات ثابت شده است و با تعیین وضعیت رفتار و نرخ خرابی المانها و قطعات، پروژه قالب اصلی خود را پیدا می کند.

ناحیه سوم: آخرین ناحیه از این منحنی که در آن خرابی ها رو به افزایش است، منطقه پیری یا فرسودگی است و این دوره هنگامی که خرابی ها رو به افزایش بوده و نسبت به زمان نرخ خرابی ثابت، زیاد می شود شروع می شود. در این ناحیه خرابیها مربوط به خطاهای اتفاقی نیست بلکه به علت کهولت و پیری قطعات می باشد.

می توان عبارات مختلف و توابع توزیع تجمعی متفاوتی برای داده های تجربی نرخ خرابی به کار برد. عبارات و توابع توزیع از حالتی به حالت دیگر متفاوت می باشند که در جدول (۳) چهار حالت مختلف ارائه شده اند.



شکل (۲) - منحنی وان [۴]

جدول (۳) - ترکیب های مختلف نرخ خرابی و تعداد خرابی [۲]

تعداد خرابی	تعداد خرابی های بالا	تعداد خرابی های بالا
ثابت / غیر ثابت بودن نرخ خرابی در طول دوره عمر		
ثابت	$\lambda = K/T$	تفسیر آماری
غیر ثابت	استفاده از توزیع وایبول	اطلاعات ناکافی

از آنجا که در بسیاری از سازه های ریلی، نرخ خرابی با زیاد شدن مقدار نیروی وارد بر آن افزایش می یابد بنابراین در مطالعه این نوع سیستم ها باید از نرخ خرابی غیر ثابت استفاده شود و از آنجا که نرخ خرابی در سازه های ریلی بالا می باشد بنابراین تابع توزیع تجمعی وایبول بهترین توزیع می باشد.
تابع توزیع تجمعی وایبول بر حسب متغیر X به صورت زیر نوشته می شود:

با مقایسه عبارت بال با فرم کلی معادله خطی یعنی $y=mx+b$ می توان نوشت:

$$\beta = m, \alpha = e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)}$$

به دست آوردن عبارتی برای محاسبه λ (MGT) و قابلیت اطمینان R (MGT):

از آنجا که در بسیاری از سازه های ریلی نرخ خرابی با مقدار نیروی وارد بر آن افزایش می یابد بنابراین در مطالعه این نوع سیستم ها باید از نرخ خرابی غیر ثابت استفاده شود جدول (۳). نرخ خرابیها و قابلیت اطمینان با استفاده از توزیع وایبول به دست می آید.
قابلیت اطمینان تابعی از زمان می باشد و واحد زمانی که برای ریل به کار می رود MGT می باشد که عبارتست از میلیون تناژ کلی که در یک سال بر روی ریل تردد می کند [۶].
برای مثال هر گاه خرابی در نظر گرفته شده سایش بیش از ۲ میلیمتر گوشه های ریل باشد فرایند محاسبه نرخ خرابیها و قابلیت اطمینان با استفاده از توزیع وایبول به صورت زیر انجام می شود:

- جمع آوری اطلاعات خطا
- رسم منحنی وایبول
- محاسبه نرخ خرابی
- محاسبه قابلیت اطمینان

جدول (۴) - داده های خرابی برای $2 \text{ mm} >$ مقدار سایش گوشه های ریل

جدول (۴) - داده های خرابی برای $2 \text{ mm} >$ مقدار سایش گوشه های ریل										
MGT	473	688	591	532	812	654	513	709	620	454

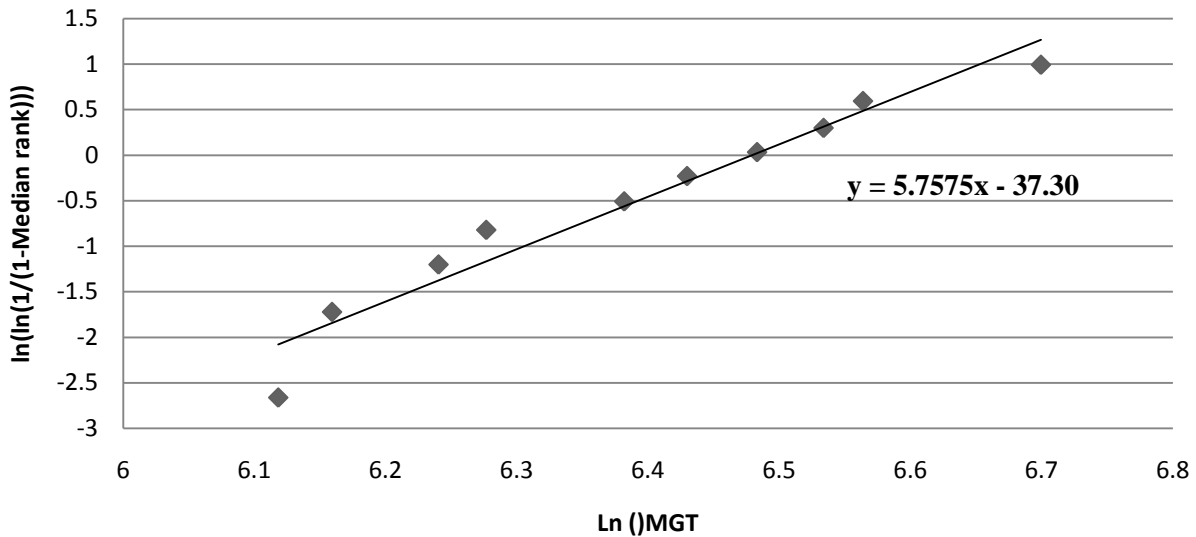
بعد از ثبت، این خرابی ها در جدولی به صورت ستونی از مقدار کم به زیاد مرتب می شوند. در ردیف سوم این جدول مقدار ردیف میانی یا Median rank از فرمول زیر محاسبه می شود:

که r ، تعداد خرابی و N تعداد خرابی هایی است که از r قبلی بیشتر می باشد. سپس نمودار $\ln(\ln(1/(1-\text{Median rank})))$ در یک نمودار لگاریتمی رسم می شود. در مرحله بعد بهترین خطی که می توان از این نقاط عبور داد رسم می شود و معادله آن نیز به دست می آید. سپس با مقایسه معادله خط به دست آمده و روابط توزیع وایبول ($\beta = m, \alpha = e^{-\frac{x}{\beta}}$) می توان عباراتی برای محاسبه نرخ خرابی و قابلیت اطمینان به دست آورد.

جدول (۵) - اطلاعات تکمیلی جهت رسم نمودار وایبول

MGT to failure	ردیف	ردیف میانی Median rank	$\ln(\ln(1/(1-\text{Median rank})))$	$\ln(\text{MGT})$
454	1	0.067307692	-2.663843085	6.118097198
473	2	0.163461538	-1.723263150	6.159095388
513	3	0.259615385	-1.202023115	6.240275845
532	4	0.355769231	-0.821666515	6.276643489
591	5	0.451923077	-0.508595394	6.381816017
620	6	0.548076923	-0.230365445	6.429719478
654	7	0.644230769	0.032924962	6.483107351
688	8	0.740384615	0.299032932	6.533788838
709	9	0.836538462	0.593977217	6.563855527
812	10	0.932692308	0.992688929	6.69950034

نمودار وایبول و میانبایی خطی برای خطای
 سایس گوشه خط > 2mm"



شکل (۳) - نمودار وایبول و میانبایی خطی برای داده های جدول

هر گاه عبارت وایبول این بار با تبدیل واحد زمان به MGT ارائه شود [۲] خواهیم داشت :

$$R(MGT) = \exp\left[-\left(\frac{MGT}{\alpha}\right)^\beta\right], \lambda(MGT) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)\left(\frac{MGT}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$

$$R(MGT) = \exp\left[-\left(\frac{MGT}{651.6106}\right)^{5.7575}\right], \lambda(MGT) = \left(\frac{5.7575}{651.6106}\right)\left(\frac{MGT}{651.6106}\right)^{4.7575}$$

اگر فرض شود که خطوط راه آهن دارای ترافیک سالیانه ای برابر MGT ۳۰ باشد، پیش بینی قابلیت اطمینان و نرخ خرابی برای سال یازدهم به صورت زیر خواهد شد:

$$۱۲ * ۳۰ = ۳۶۰ \text{ MGT}$$

$$R(MGT) = \exp\left[-\left(\frac{360}{651.6106}\right)^{5.7575}\right] = 0.9677$$

رابطه نرخ خرابی و قابلیت اطمینان با هزینه ها:

هم نرخ خرابی و هم قابلیت اطمینان بر روی هزینه ها تاثیر خواهند گذاشت. این هزینه ها می تواند ناشی از اقدامات تعمیراتی پیشگیرانه/ اصلاحی و یا حوادث باشد. برای مثال هر گاه خرابی ریل، شکست آن باشد که برای رفع آن نیاز به تعویض قسمتی از خط باشد این اقدام تعمیری منجر به هزینه خواهد بود. بنا بر این برای ارزیابی هزینه حالات مختلف خرابی می توان از عبارات نرخ خرابی و قابلیت اطمینان کمک گرفت. برای این منظور می توان از آنالیز پارتو استفاده نمود. در این آنالیز، عدم قابلیت اطمینان (احتمال خرابی) در هزینه ای که این خرابی در مدت زمان مورد نظر ایجاد کرده است ضرب می گردد. مقادیر بدست آمده نشان خواهد داد که کدام حالت خرابی بیشترین هزینه را در بر خواهد داشت. نمایش ساده ای از این آنالیز با فرض خرابی های جدول (۶) در ادامه آمده است.

جدول (۶) - نمونه خطاها، هزینه و زمان تعمیر (فرضی)

خطا	هزینه متوسط عملیات تعمیر	زمان متوسط توقف (MDT) عملیات تعمیر
۲ میلیمتر >سایش کناری خط	۵۰۰۰۰۰ تومان	۳ ساعت
۱ میلیمتر >دامنه موج خط	۳۰۰۰۰۰ تومان	۲ ساعت
قوز کردن خط	۶۰۰۰۰۰ تومان	۳.۵ ساعت
شکست ریل	۱۶۰۰۰۰۰ تومان	۵ ساعت

سپس نرخ خرابیها و قابلیت اطمینان به کمک توزیع وایبول برای هرکدام از خرابیها به دست آمده و عدم قابلیت اطمینان برای ده سال محاسبه می شود.

جدول (۷) - عدم قابلیت اطمینان برای خرابی های ریل

خطا	عدم قابلیت اطمینان Q (برای ۱۰سال)
۲ میلیمتر >سایش کناری خط	۰.۲
۱ میلیمتر >دامنه موج خط	۰.۳
خم شدن خط	۰.۲۵
شکست ریل	۰.۰۵

سپس با ضرب عدم قابلیت اطمینان در هزینه ها و MDT می توان جدول زیر را به دست آورد. همان طور که مشاهده می شود بیشترین هزینه را خرابی خم شدن خط به همراه دارد.

جدول (۸) - آنالیز پارتو برای خرابی های ریل

خطا	Q (برای ۱۰سال)* هزینه	MDT*Q (برای ۱۰سال)
۲ میلیمتر >سایش کناری خط	۱۰۰۰۰۰۰ تومان	۰.۲۵ ساعت
۱ میلیمتر >دامنه موج خط	۹۰۰۰۰۰۰ تومان	۰.۶ ساعت
خم شدن خط	۱۵۰۰۰۰۰ تومان	۰.۶ ساعت
شکست ریل	۸۰۰۰۰۰۰ تومان	۰.۶ ساعت

نتایج:

با توجه به اهمیت جلب رضایت مسافران و کاهش احتمال در سیر نبودن قطار به دلیل خرابی های ریل ، می بایست در همان ابتدای شروع فاز طراحی به مفاهیم قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، قابلیت تعمیرات و ایمنی (RAMS) توجه گردد. یکی از تکنیک های مورد استفاده بدین صورت می باشد که در ابتدا جمع آوری اطلاعات خرابی به دقت انجام می گردد. سپس به کمک این داده ها و به کمک یک توزیع مناسب برای نرخ خرابی غیر ثابت، قابلیت اطمینان و نرخ خرابیها محاسبه می شود. در این مقاله از توزیع تجمعی وایبول برای محاسبه قابلیت اطمینان و نرخ خرابیها استفاده شده است. قابلیت اطمینان بالاتر و نرخ خرابی پایین تر بسیار مناسب می باشد. به دست آوردن قابلیت اطمینان بالا به معنی قابلیت در دسترس بودن بالا و ایمنی بالا نیز می باشد. ایمنی بالا به معنای کارکردن بدون تنش پرسنل و اعتماد بیشتر مسافری می باشد. بنابراین می بایست در فاز طراحی به منظور دسترسی به سود و رضایت مشتری پارامترهای RAMS در نظر گرفته شوند. قابلیت اطمینان و نرخ خرابی به مدیران تعمیر و نگهداری ریل اجازه خواهد داد که ترکیب سازه های ریلی مختلف را با هم مقایسه کنند.

منابع:

- 1- Goncalo Medeiros Pais Simoes , RAMS analysis of railway track infrastructure, Dissertation for the qualification in the Msc. degree in Mestrado Integrado em Engenharia Civil. September 2008.
- 2- Ambika Prasad Patra, Luleå , RAMS and LCC in Rail Track Maintenance, University of Technology Division of Operation and Maintenance Engineering , 2007
- 3- BS EN 50126,50126-3:2006: Railway applications -The specification and demonstration of Reliability,Availability, Maintainability and Safety (RAMS)
- 4- Design for Reliability., Dana Crowe & Alec Feinberg, 2001
- 5- Dušan Milutinović ,Vojkan Lučanin ,Relation between Reliability and Availability of Railway Vehicles, , FME Transactions (2005)
- 6-Reliability & maintenance case study blischke & murty, 2004