

محاسبه هزینه در طول عمر "LCC" برای وسایل نقلیه ریلی

محور مقاله: ناوگان - سیستم های پیشرفته تعمیرات و نگهداری

محمد نوروزی¹

چکیده

در این مقاله سعی شده است تا با روشی ساده به فرایند محاسباتی هزینه در طول عمر (LCC) Life Cycle Cost برای یک وسایل نقلیه ریلی پرداخته شود تا بر اساس محاسبه LCC محصول، نحوه طراحی، تغییرات احتمالی و بهره برداری آن مشخص گردد. مشخص شدن LCC هم برای تولید کننده و هم برای مصرف کننده و بهره بردار به عنوان شاخصی عمده در ارزیابی محصول به شمار می آید که فاکتوری مناسب برای ارزیابی کیفی محصول خواهد بود. پایین بودن LCC در طول مدت بهره برداری نشان دهنده این موضوع است که محصول تا چه میزان در محدوده طراحی مناسب قرار داشته و از کیفیت مطلوب برخوردار است.

کلمات کلیدی: هزینه در طول عمر، LCC، RAMS، تعمیر و نگهداری

۱. مقدمه

در سه دهه اخیر و با انقلاب بزرگی که در تمام صنایع در زمینه ارزش گذاری شاخص های حیاتی برای بهره برداری یک محصول با عنوان RAMS² به وجود آمد، این واقعیت که این شاخص ها فقط برای بهره بردار جذاب نبوده و تولید کنندگان نیز آنها را مدنظر قرارداده اند، بیشتر نمود پیدا کرد. ایجاد یک رابطه دو طرفه برای فروشنده و خریدار (بهره بردار) شرایطی را بوجود آورده است که امروز در کنار هر محصول ریلی اعم از لکوموتیو، ریل باس، ترن ست، واگن و ... شاخص های RAMS نیز از پارامترهای مهمی است که سازندگان و یا فروشنندگان از آنها به عنوان شاخصهای کیفیت محصول نام برده و در بیان کیفیت محصول از آنها یاد می کنند. در کنار این پارامترها عامل دیگری نیز وجود دارد که ترکیبی است از هزینه های تحمیل شده در تولید و بهره برداری یک محصول در بازه زمانی طول عمر محصول آن محصول. این شاخص به نام "هزینه در طول عمر" معرفی می شود. که برای هر وسیله ایی این شاخص قابل تعریف می باشد. در این مقاله و در ادامه آن سعی شده است به اصول اولیه برای محاسبه شاخص "هزینه در طول عمر" یا LCC پرداخته شده و این موضوع مورد بررسی و تعریف قرار گیرد.

آنچه که مشخص است هزینه یابی و پیش بینی "هزینه ها در طول عمر" یا LCC برای هر وسیله نقلیه ریلی، چه برای بهره دار و چه برای سازنده به عنوان فاکتوری موثر، قابل اعتنا می باشد. پایین تر بودن هزینه در طول عمر یا LCC، از زاویه دید بهره بردار (خریدار) یعنی خرید محصولی با کیفیت بالا و راندمان بیشتر و از دید فروشنده به عنوان شاخصی حیاتی در بیان کیفیت

محصول ارایه شده می باشد. در این وضعیت خریدار می تواند با نگرش بر LCC با یک مدیریت مناسب ساختار و شالوده آتی برنامه های تعمیراتی خود را تعیین نماید و از طرفی فروشنده نیز در بخش تولید و ساخت، یک محصول مناسب را با حداقل هزینه طراحی نماید. آنچه که از این فرایند حاصل می شود در بخش تولید و ساخت، شناخت بهتر و دقیق تر نقاط بحرانی محصول ریلی و در نتیجه افزایش کیفیت قطعات و قیمت نهایی محصول بوده و در بخش بهره برداری نتیجه آن کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری و در نتیجه افزایش شاخص های RAMS خواهد بود.

۲. اصول اولیه روش محاسبه " هزینه در طول عمر" یا LCC

تمام پارامترهای مربوط به هزینه یابی های LCC نهایی محصول باید در ارزیابی های انجام شده مد نظر قرار گیرند. گروهی از این هزینه ها شامل هزینه های قبل از بهره برداری می باشد و گروهی دیگر شامل هزینه های بعد از تولید و بهره برداری خواهد شد. هر چند ارزیابی هزینه تک تک پارامترها مشکل بوده و به بانک اطلاعاتی قوی و مستندی نیاز دارد ولی با مدلسازی می توان به شاخص قابل قبولی از هزینه ها و در نهایت LCC محصول نایل شد. هزینه های پیش بینی شده برای ارزیابی نهایی LCC، هزینه هایی نظیر هزینه های خرید، هزینه های تعمیر و نگهداری، هزینه های تحمیلی ایجاد شده در بخش خدمات پس از فروش، هزینه های مشتری مداری شامل تهیه اسناد، دانش فنی، آموزش و ... را شامل خواهد شد.

۳. بهینه سازی و کاهش هزینه ها با مدیریت "خرابی های ایمن"

یکی از مهمترین پارامترهایی که در ارزیابی های شاخص های RAMS و پیش بینی های LCC مد نظر قرار می گیرد فاکتوری است که به نام "خرابی ایمن" یا Fail Safe تعریف می شود. براساس تعریف، "خرابی ایمن" شامل سیستمی خواهد بود که در صورت بروز یک خرابی و یا نقص در یک قطعه و یا مجموعه اتفاقات ناگوار بعدی برای اپراتورها و یا سایر مجموعه ها بوقوع نپیوندد. به عبارت دیگر تعریف "خرابی ایمن" پیش بینی خرابی سیستم و ارایه راهکار برای آن خواهد بود. به عنوان مثال سیستم ترمز در وسایل نقلیه ریلی یک سیستم خرابی ایمن می باشد زیرا در صورت بروز هر عیبی در سیستم، خودروی ریلی مورد نظر با ترمز اضطراری توقف خواهد کرد. با توجه به تعریف فوق مشخص می شود که هزینه های طراحی و تحقیقاتی و نیز تولید وسایل نقلیه با خرابی ایمن بالا، بیشتر از وسیله نقلیه ایی با خرابی ایمن پایین تر خواهد بود. از طرفی وسایل نقلیه با خرابی ایمن بالاتر در بهره برداری دارای هزینه های تعمیر و نگهداری کمتری خواهند بود. با توجه به تعریف فوق و در مجموع می توان با رعایت خرابی ایمن در طراحی ها در وسایل نقلیه ریلی، انتظار پایین آمدن LCC را داشت. هر چند در بخش طراحی و تحقیق در فاز پیدایش هر محصول ریلی با افزایش هزینه ها مواجه می شویم اما با گذشت زمان و نیز تولید انبوه محصول تولید شده هزینه های تعمیر و نگهداری کاهش یافته و این هزینه ها در آن مستهلک می شود.

۴. بهینه سازی و بهبود " هزینه در طول عمر" یا LCC محصول

کیفیت قطعات ساخته شده و بکار رفته در یک وسیله و به تبع آن توزیع خرابی ها در مجموعه ها و زیرمجموعه های آن دارای اهمیت بوده و شاخص های LCC و البته RAMS از آنها تاثیر پذیر خواهند بود. تعداد خرابی ها در هر وسیله و نحوه توزیع آن در قسمتهای مختلف شاخص بسیار مناسبی است تا بتوان نقاط بحرانی را شناسایی کرده و نسبت به اصلاح آن اقدام نمود. آنچه که مشخص است یافتن نقاط بحرانی عاملی در کم کردن LCC و افزایش و بهبود شاخص های RAMS می باشد. با توجه به موارد فوق میتوان انتظار داشت:

در هر مجموعه از وسیله نقلیه ریلی برای رسیدن به بهترین وضعیت "خرابی ایمن"، هزینه های تحقیق و طراحی افزایش خواهد یافت.

در صورت افزایش قابلیت و در نظر داشتن "خرابی ایمن" هزینه های تعمیر و نگهداری کاهش خواهد یافت.

۱- ترکیب هزینه های تولید و تعمیر و نگهداری با گذشت زمان و نیز تولید انبوه خودروی تولید شده باعث می شود تا

LCC "هزینه در طول عمر" کاهش یابد. به عبارت دیگر این هزینه ها در آن مستهلک می شود.

در هر وسیله نقلیه ریلی، قیمت نهایی محصول و به تبع آن هزینه در طول عمر آن با توجه به هزینه های صرف شده قابل محاسبه و استخراج خواهد بود. این هزینه ها بطور کلی در سه بخش عمده زیر تعریف خواهند شد:

C_D^1 هزینه های تحقیق، توسعه و طراحی

C_{PM}^2 هزینه های تعمیرات پیشگیرانه

C_{RM}^3 هزینه های تعمیرات اصلاحی

با نظر به بخش های مورد اشاره خواهیم داشت:

$$C_T = C_D + C_{PM} + C_{RM} \quad (1)$$

به عبارت دیگر هزینه های کل برای یک محصول عبارت خواهند بود از مجموعه های هزینه های تحقیق و توسعه، خرید و هزینه های تعمیرات پیشگیرانه و هزینه تعمیرات اصلاحی.

در ادامه هریک از پارامترهای موثر در هزینه یابی محصول بطور کلی تعریف شده و در یک مدل ارائه می گردد.

۵. هزینه های خرید و توسعه محصول

اگر نرخ خرابی ها در یک بازه برای یک محصول ریلی را برابر با λ در نظر بگیریم، آنگاه $C_D = f(\lambda)$ خواهد بود. طبق تعریف هزینه های طراحی و تولید محصول تابعی خواهد بود از نرخ خرابی هایی که برای محصول پیش بینی می کنیم. ضمن آنکه تابع $C_D = f(\lambda)$ خود تابعی از متغیرهایی نظیر تکنولوژی های مورد استفاده در قطعات، تعداد محصول تولید شده و سایر فاکتورهای موثر در طراحی و ساخت می باشد. هنگامیکه یک وسیله با حداقل "خرابی ایمن" طراحی می شود، نرخ و شدت خرابی ها در بهره برداری افزایش می یابد؛ در این وضعیت سازنده و طراح در صورتی که بخواهد محصولی با حداقل خرابی و نیز کیفیت بالاتر تولید نماید، به تبع آن هزینه های خرید و تحقیق برای رفع مشکل افزایش می یابد. به عبارت دیگر تابع هزینه های تحقیق و توسعه و ساخت نسبت عکس با تعداد خرابی ها خواهد داشت. با توجه به تعریف فوق تابع مورد انتظار برای این رابطه را می توان به شکل ساده تابع زیر نشان داد:

$$C_D = \frac{E}{\lambda} \quad (2)$$

در این تابع نماد (Expense) E بیانگر مقدار عددی هزینه های طراحی و تولید می باشد. با توجه به تابع فوق در وسایل نقلیه هرچه نرخ خرابی ها به سمت صفر میل کند هزینه های C_D نیز به بینهایت میل می کند. به عبارت بهتر برای داشتن یک وسیله نقلیه با نرخ خرابی پایین، افزایش هزینه در بخش تولید و تحقیق پیش بینی می شود.

Development Cost ¹

Preventive Maintenance Cost ²

Repair Maintenance ³

۶. هزینه های تعمیرات پیشگیرانه محصول

در وسایل نقلیه با نرخ خرابی های صفر، هزینه های تعمیرات پیشگیرانه یا C_{PM} نیز صفر خواهد بود. این عبارت به آن معنی است که تابع مورد انتظار برای C_{PM} با نرخ خرابی ها λ نسبت مستقیم دارد. به عبارت دیگر اگر بتوان وسیله نقلیه ای تولید کنیم که در آن هزینه تعمیرات پیشگیرانه پایین باشد و در واقع دوره های بازدید تعمیرات پیشگیرانه برای آن بلند باشد نرخ خرابی ها در بازه های طولانی تر بوده و در بازه زمان نرخ خرابی ها کاهش خواهد یافت. با این فرضیه می توان رابطه هزینه های تعمیرات پیشگیرانه با نرخ خرابی ها را به تابع زیر مستند نموده و انتظار داشت:

$$C_{PM} = K \cdot \lambda \quad (3)$$

ضریب K در فرمول فوق مقدار عددی هزینه های تعمیرات پیشگیرانه است که با توجه به بهره برداری های بومی و منطقه ای، کیفیت قطعات یدکی مورد مصرف و براساس تجربه استخراج می شود.

۷. هزینه های تعمیرات اصلاحی محصول

برای یک وسیله نقلیه ریلی هزینه های تعمیراتی شامل دو نوع هزینه می باشد. گروه اول هزینه های تعمیرات پیشگیرانه C_{PM} است. این گروه از هزینه ها مطابق با دستورالعمل بوده و با توجه به تکنولوژی ساخت و شرایط پیش بینی شده در بهره برداری ها استخراج می شود. گروه دوم هزینه ها شامل هزینه های تعمیرات اصلاحی C_{RM} می باشد. هزینه تعمیرات اصلاحی با توجه به شرایط زیر برای محصول بوجود آمده و مشخص می شود. به عبارت دیگر شاخص های تعیین کننده در هزینه تعمیرات اصلاحی عبارتند از:

نحوه بهره برداری محصول (تابعی از شرایط فرهنگی، آب و هوایی، فرهنگ کاربری)
کیفیت قطعات ساخته شده

اجرای صحیح و به موقع دستورالعمل ها برای تعمیرات پیشگیرانه
سوانح

تجربیات در سایر تحقیقات نشان داده است که نمودار هزینه های تعمیرات اصلاحی برای یک محصول ریلی بصورت تابعی صعودی از نرخ خرابی ها در سیر، قابل بسط و ارایه می باشد. مخصوصاً در وضعیتی که محصول با ضریب اطمینان و "خرابی ایمن" پایین طراحی شده باشد، شیب این تابع زیاد خواهد بود. به عبارت دیگر خرابی های در طول سیر، تعیین کننده این هزینه بوده و فقط هنگامیکه محصول بهره برداری می شود این هزینه ها بوجود خواهند آمد. تابع هزینه های تعمیرات برای یک محصول ریلی در بازه زمان تابعی است با خصوصیت صعودی و پیوسته. با توجه به موارد فوق تابع زیر برای هزینه های تعمیرات پیش بینی می گردد:

$$C_{RM} = A + B\lambda \quad (4)$$

در این تابع هزینه های ثابت A به عنوان پارامتری است که مستقل از طراحی ها و کیفیت قطعات محصول بوده و هزینه هایی است که به عنوان مثال در سوانح و یا فرهنگ بهره برداری بوجود خواهد آمد. اما شاخص B شامل هزینه هایی خواهد بود که به دلیل خرابی قطعات و مجموعه ها و وابسته به طراحی و ساخت بوجود می آید.

۸. روش محاسبه نرخ خرابی بهینه

با توجه به روابط فوق و هزینه های پیش بینی شده می توان با انجام عملیات مشتق گیری از توابع نسبت به پارامتر λ نقطه بهینه در هزینه را با توجه به خرابی ها استخراج نمود. قبل از انجام محاسبات پیش فرض های زیر در نظر گرفته شده است: هزینه های ابزار، تجهیز کارگاه و سوله، انرژی و دستمزد در ضرایب ثابت هزینه های تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی دیده شده است. نرخ تورم، استهلاک زمان در محاسبات در نظر گرفته نشده است.

لذا با توجه به پیش فرضهای فوق و با استفاده رابطه حاکم بر فرمول شماره (۱) برای هزینه های کلی یک محصول در طول بهره برداری خواهیم داشت:

$$C_T = C_D + C_{PM} + C_{RM}$$

با جایگذاری توابع فرمولهای شماره ۲ و ۳ و ۴ در رابطه شماره ۱ داریم:

$$c_T(\lambda) = \frac{E}{\lambda} + K \cdot \lambda + A + B \cdot \lambda \quad (5)$$

از رابطه فوق وبا مشتق گیری نسبت به متغیر λ به عنوان نرخ خرابی ها، و پس از آن، حل معادله به دست آمده می توان نقطه بهینه برای میزان نرخ خرابی ها را محاسبه نمود. لذا خواهیم داشت:

$$\frac{dC_T(\lambda)}{d\lambda} = -\frac{E}{\lambda^2} + K + B \quad (6)$$

$$-\frac{E}{\lambda^2} + K + B = 0 \Rightarrow \frac{E}{\lambda^2} = K + B \quad (7)$$

$$\lambda_{OPT} = \sqrt{\frac{E}{K + B}} \quad (8)$$

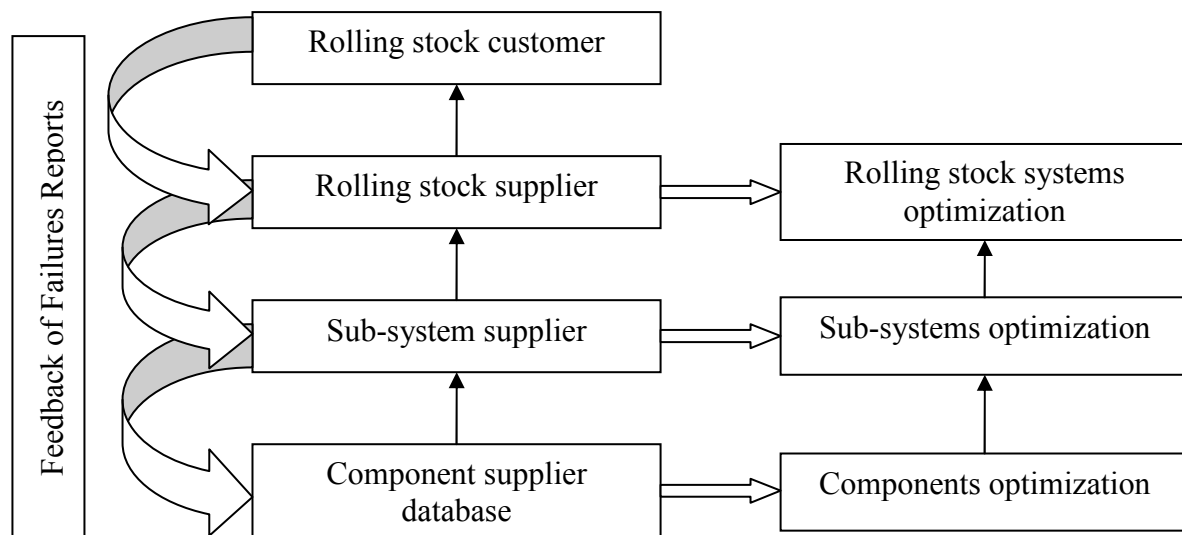
مقدار به دست آمده از رابطه فوق میزان بهینه نرخ خرابی برای یک وسیله نقلیه در مدت عمر تعریف شده خود خواهد بود. تابع فوق یک مبنای اولیه برای درک صحیح از تعریف LCC و پارامترهای دخیل در مقدار آن خواهد بود. تابع فوق نشان می دهد که هزینه های ساخت و طراحی برای هر محصول از عمده ترین هزینه هایی خواهد بود که در محاسبه LCC موثر هستند.

۹. مبنای محاسبه و استخراج LCC

با توجه به موارد فوق استخراج مقدار LCC برای هر وسیله ریلی در بازه زمان و یا کیلومتر قابل ارایه خواهد بود. به عنوان مثال برای چرخ، محاسبه LCC بر حسب زمان غیر واقعی و غیر منطقی خواهد بود زیرا مبنای مقدار کارکرد برای یک چرخ و میزان طول عمر و سایش آن بر حسب کیلومتر می باشد. ولی برای یک موتور دیزل با کاربرد ریلی مبنای طول عمر برای آن ساعت کارکرد بوده و بر اساس ساعت کارکرد موتور زمان عمر موتور محاسبه خواهد شد. زیرا در طول زمان بهره برداری از موتور، ممکن است موتور روشن باشد، اما زیر بار قرار نگرفته باشد.

برای یک خودروی ریلی استخراج هزینه های واقعی LCC بطور خلاصه در مدل زیر قابل ارایه خواهد بود. تعامل و همکاری نزدیک بین سازندگان مجموعه ها و زیر مجموعه ها با سازنده اصلی محصول و همچنین همکاری نزدیک بین خریدار یا بهره بردار و تشکیل بانک های اطلاعاتی دقیق از هزینه ها و پارامترهای بهره برداری برای رسیدن به مقدار واقعی LCC ضروری است.

مدل زیر شماتیکی از یک فرایند هزینه یابی برای محاسبه دقیق تر و بهتر LCC خواهد بود.



شکل ۱- نمایی از منطق انتقال اطلاعات بین سازندگان و خریدار

تهیه بانک های اطلاعاتی، تعامل دقیق و سازنده بین تولید کننده و بهره بردار از مهمترین شاخص های این مدل می باشد. اینکه تولید کننده اطلاعات دقیقی را از نحوه بهره برداری، شرایط تعمیر و نگهداری، شرایط جوی و سایر پارامترهای دخیل در طراحی یک محصول را داشته باشد در تولید یک محصول و ارایه کیفیت مناسب آن موثر است. به همان میزان ارسال دقیق اطلاعات مورد درخواست تولید کننده از خریدار و نیز نحوه صحیح نگهداری و هزینه یابی محصول و ارایه بازخورد به تولید کننده نیز عاملی خواهد بود که محاسبه دقیق LCC را میسر می سازد.

در ادامه زیر نمونه ای عددی برای محاسبه LCC یک خودروی ریلی ارایه می شود.

فرض می شود محصولی را می خواهیم طراحی و تولید کنیم که به ازای هر یک میلیون کیلومتر ۲۰ عدد خرابی را برای آن پیش بینی کنیم. به عبارت دیگر نرخ خرابی برای این محصول را ۲۰ عدد در یک میلیون کیلومتر در نظر می گیریم. خرابی هایی را که مانع از ادامه سیر شوند مد نظر قرار داده ایم).

$$\lambda = 20$$

از طرفی مجموعه هزینه های تعمیر و نگهداری برای این محصول با طراحی ۲۰ خرابی به ازای یک میلیون کیلومتر را معادل ۵۰۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال پیش بینی می کنیم. با پیش فرضهای فوق داریم :

$$\lambda_{OPT} = \sqrt{\frac{E}{K + B}} \Rightarrow 20 = \sqrt{\frac{E}{500.000.000}}$$

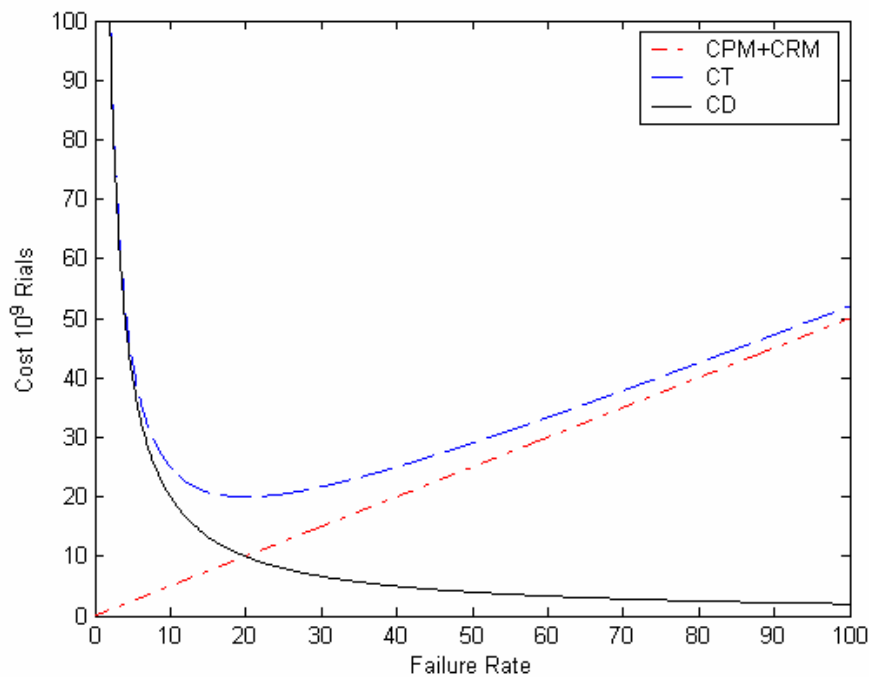
$$E = 200.000.000.000 \text{ Rials}$$

همانطوری که ملاحظه می شود رقمی را برای هزینه کلی محصولی با این مشخصات استخراج کرده ایم معادل دویست میلیارد ریال خواهد بود.

اصولا طراحی یک محصول با این نرخ خرابی در این بازه مسافتی یعنی تولید وسیله ای با کیفیتی بسیار مطلوب و پیش بینی افزایش هزینه های طراحی و ساخت. حال اگر مقرر باشد تا نرخ خرابی ها افزایش یابد به همان میزان با افزایش هزینه های تعمیراتی مواجه بوده و در نتیجه کاهش هزینه های ساخت را خواهیم داشت.

با تقسیم این رقم به نرخ خرابی ها به رقم ۱۰/۰۰۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال می رسیم که روی نمودار معرف هزینه های طراحی و تحقیقات خواهد بود.

نمودار زیر بصورت ساده برای هر یک از توابع C_D و مجموع هزینه های تعمیر و نگهداری $C_{RM}+C_{PM}$ و با پیش فرضهای نمونه مدل شده به شرح زیر رسم شده است، که به شکل زیر قابل ارایه خواهد بود.



شکل ۲- نمودارهای مربوط به توابع هزینه ها نسبت نرخ خرابی ها

همانطوریکه در نمودار فوق ملاحظه می شود به ازای نرخ خرابی های کمتر، هزینه های تعمیر و نگهداری نیز کاهش می یابد اما نمودار مربوط به هزینه های تحقیق و طراحی و ساخت محصول به شدت افزایش می یابد. این نمودار نشان می دهد به هر مقدار که در نظر باشد تا محصول از کیفیت ساخت مطلوب تر و نیز با کیفیت تری برخوردار شود هزینه های تولید تا چه میزان افزایش می یابد. این هزینه ها برای تولید یک محصول با نرخ خرابی صفر بینهایت خواهد بود.

آنچه که واضح است با پیش بینی افزایش نرخ خرابی، هزینه های تعمیر و نگهداری نیز افزایش می یابد؛ اما هزینه ها در ساخت و طراحی و تولید کاهش خواهد داشت. مجموع هزینه ها که در واقع رقم اصلی میزان LCC را تعیین می کند و مجموع هر دو تابع می باشد نشان می دهد که مقدار بهینه ای برای خرابی ها وجود دارد که در آن تابع هزینه های کل C_T در مینیمم خود قرار دارد.

برای مدل فوق ملاحظه می شود که هزینه های کل برابر با دویست میلیارد ریال برای بهره برداری در یک میلیون کیلومتر خواهد بود. به عبارت دیگر LCC این محصول تا یک میلیون کیلومتر برابر ۲۰۰/۰۰۰ هزار ریال بر هر کیلومتر خواهد بود.

۱۰. نتیجه گیری

در واقع این تفکر که هرچه کیفیت محصول بالاتر باشد، هزینه های تعمیر و نگهداری پایین تری خواهیم داشت برای بهره بردار جذاب خواهد بود اما برای رسیدن به این تفکر، سازنده باید هزینه های زیادی را برای رسیدن به آن متحمل شود که رسیدن به این موضوع، قیمت محصول را افزایش می دهد. به همین دلیل نقطه ای که بتوان آن را نقطه بهینه ای برای نرخ خرابی ها فرض نمود وجود خواهد داشت. تابع $\lambda_{OPT} = \sqrt{\frac{E}{K+B}}$ به طور خلاصه نشان می دهد که برای طراحی یک محصول با حداقل میزان خرابی چه رابطه ای بین هزینه های تولید و هزینه های تعمیر و نگهداری برقرار خواهد بود. به عبارت دیگر این تابع نشان دهنده این مطلب است که چه رابطه ای بین هزینه های قبل از فروش محصول و بعد از فروش محصول برقرار است. طراحی محصولی با شاخص های RAMS مطلوب و داشتن LCC کم از مهمترین شاخص های یک محصول ریلی مناسب است که خریدار باید قبل از خرید آن مدنظر قرار دهد .

مراجع

- 1- A.danek , " life cycle cost philosophy of railway vehicle",ostrava university.
- 2-D.milutinovic , "relation ship between reliability and availability of rail way vehicle",Serbian railway
- 3-M.witt & S.herzberge," Technical-economical System Comparison of High Speed Railway Systems",
- 4-www.unife.org