ارائه مدلی به منظور تعیین سیاست نگهداری اثربخش با رویکرد پویایی سیستم

محمدحسین سلیمی[۱*]، علیرضا ایرج‌پور[۲]

۱. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲. دانشجوی دکتری مدیریت تولید و عملیات دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۵/۲۸، تاریخ تصویب ۸۵/۸/۲۷)

چکیده

در این تحقیق با توجه به ماهیت پویای سیستم‌ها و ماشین‌آلات تلاش در جهت ارائه مدلی گردیده است که بتواند این ویژگی را در طراحی مدل نگهداری لحاظ نماید. بدین منظوریک مدل سیستم پویا ارائه گردیده است که مهمترین متغیرهای تاثیرگذار در طول چرخه عمر همچون عمر سیستم، میزان بحرانی بودن ماموریت، سطح دسترسی، بهبود در قطعات و سیستم‌ها، نرخ شکست و... را در انتخاب و ارزیابی سیاست نگهداری مد نظر قرار می‌دهد. در واقع به دنبال توسعه و ارائه چارچوبی هستیم که هم بتواند به ارزیابی سیاست‌های نگهداری سیستم بپردازد و هم تاثیر پارامترهای نگهداری بر هزینه چرخه عمر سیستم را شبیه سازی نماید. معیارهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری اثربخشی سیاست نگهداری مورد استفاده، هزینه چرخه عمر و خرابی‌های تجمعی میباشند. در این تحقیق با استفاده از دانش سیستم پویا مدل‌سازی نگهداری صورت پذیرفته است. در واقع هدف هر مدل نگهداری ایجاد تعادل بین هزینه‌های خرابی و فرصت از دست رفته با هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه می باشد که این اصل در مدل پیشنهادی در تعیین سیاست نگهداری پیشگیرانه بر اساس پیش‌بینی فرصت از دست رفته ملاک عمل بوده است. روش بکار گرفته شده مبتنی بر پیش‌بینی خرابی‌های آینده با استفاده از متوسط فرصتهای از دست رفته تجمعی می‌باشد. مدل ارائه شده، چارچوب ارزیابی و تصمیم‌گیری در سطوح سه گانه مدیریت عملیاتی، میانی و سطوح بالا به منظور انتخاب سیاست اثر بخش نگهداری را مشخّص می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: پویایی سیستم، هزینه چرخه عمر، معادلات داینامو، متغیرهای نرخ و حالت

* نویسنده مسؤول Email: irajpor@yahoo.com

مقدمه

در تمامی تصمیمات مرتبط با خرید ماشین‌آلات و تجهیزات میبایست با توجه به هزینه‌های متّرتب در طول چرخه عمر همچون هزینه های عملیاتی، هزینه های نگهداری اصلاحی و هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه حتی‌الامکان نگرش بلند مدت مد نظر قرار گیرد. این مسئله در خصوص ارائه تکنولوژی های جدید نیز مصداق دارد. یکی از اصول مفروض در مدیریت نگهداری ایجاد تعادل بین هزینه چرخه عمر با اثربخشی سیستم یا سطوح دسترسی به سیستم می باشد. پویایی سیستم روشی است که وجوه مشخصه سیستم های بازخور را شناسائی نموده و نشان می دهد که چگونه ساختار، سیاست‌ها و تصمیمات بر رشد و ثبات سیستم تاثیر می‌گذارند [۹]. شناسائی و توجه دقیق به فرایند و ماهیت آن از یک سو بیان‌گر شاخص بحرانی بودن ماشین یا سیستم و از سوی دیگر به عنوان عاملی تعدیل کننده در تصمیمات خرید اثر گذار خواهند بود. بدین سبب در مدیریت هزینه چرخه عمر بایست تعادل بین عوامل فوق الذکر لحاظ گردیده و تصمیمات خرید بر این مبنا صورت پذیرد، در غیر این صورت مواجه با روزمرگی شده و ضمن در نادیده گرفتن افق زمانی بلند مدت، ماشین‌آلات و تجهیزاتی خواهیم داشت که بار سنگینی از هزینه های عملیاتی، نگهداری پیشگیرانه و نگهداری اصلاحی را یدک می کشند، مضاف بر این که سطوح دسترسی به سیستم به کمترین مقدار تنزل خواهد یافت. معمولاً مدل‌های موجود و مورد استفاده در مدیریت نگهداری صرفاً بر تعداد اندکی متغیر تمرکز داشته و تعداد بسیار زیادی از متغیرهای مهم همچون تجربه پرسنل نگهداری، ارتقاء درجه تکنولوژی و غیره مورد غفلت واقع شده‌اند [۳]. بدین منظور بایستی از مدلی استفاده نمود که بتواند متغیرها و پارامترهای مهم تأثیرگذار بر سیستم در طول دوران عمر عملیاتی را شناسایی و با یکدیگر ادغام نموده و قابلیت تجزیه و تحلیل هر سیستمی را داشته باشد که مدل پویایی سیستم دارای چنین ویژگی است. در واقع مدل پویایی سیستم تعامل میان متغیرها و پارامترهای مختلف در محاسبه هزینه چرخه عمر را در نظر می‌گیرد. در مدل‌های رایج مدیریت نگهداری بیشترین استفاده از مدلهای برنامه‌ریزی خطی، غیر خطی و نیز چرخه مارکوف است. این مدلها بواسطه اینکه حلقه‌های بازخور را در نظر نمی‌گیرند دارای نقص بوده در حالیکه سیستم پویا این مشکل را حل کرده و به هنگام تصمیم‌گیری اثربخشی بیشتری دارد [۱۸]

[۱۴][۶] و نتایج شبیه سازی گواه بر این می‌باشد که این مدل می‌تواند خصوصاً هنگامی که نرخ خرابی سیستم به وضوح مشخص نیست مورد استفاده قرار گیرد.

اهداف تحقیق

هدف این تحقیق ارائه یک مدل سیستم پویا به منظور تعیین اثر بخش سیاست مناسب نگهداری(ثابت و متغیر)با توجه به متغیرهایی همچون عمر سیستم، تجربه پرسنل نگهداری، برنامه‌های پیشگیرانه، بحرانی بودن ماموریت و سطح بهبود قطعات/ سیستم می‌باشد. ضمناً برخی پارامترهای مورد نیاز در محاسبات هزینه چرخه عمر با استفاده از چرخه شبیه‌سازی تولید خواهد شد.

روش تحقیق

تحقیق حاضر از نوع کاربردی می باشد که از روش توصیفی استفاده شده است. در این روش تمامی عوامل مرتبط با هدف تحقیق همچون سطح تکنولوژی، فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه و عمر را در محاسبه هزینه چرخه عمر سیستم مورد استفاده قرار می دهیم. مدل شامل پارامترهای مهم جهت تشریح سیستم مورد نظر میباشد. برخی از این پارامترها ذهنی بوده و توسط یک کارشناس متخصص تخمین زده شده و یا از اطلاعات موجود در سیستم‌های مشابه قابل استخراج خواهد بود. همچنین برخی پارامترها وجود دارند که بر اساس سیاست‌های مدیریت تعیین خواهند شد. این مدل شامل برخی پارامترها به منظور توصیف سیستم تحت بررسی بوده و در واقع، مبنای تصمیمات مرتبط با سیاست نگهداری را مشخص می‌سازد. بعضی از این پارامترها ذهنی بوده و بر اساس قضاوت متخصص امر و یا از داده‌های موجود در سوابق سیستمهای مشابه به‌دست خواهد آمد. برخی دیگر نیز متأثر از سیاست‌های مدیریت خواهند بود که تمامی پارامترها می‌توانند تابعی از زمان و یا به عنوان یک ثابت در نظر گرفته شوند. اساس شکل‌گیری این مدل بر هدف اصلی هر مسئله نگهداری که همانا ایجاد تعادل بین هزینه و فرصت از دست رفته با هزینه نگهداری پیشگیرانه است، می‌باشد. متوسط فرصت از دست رفته تجمعی برای تعیین تعداد نگهداری پیشگیرانه دوره بعد استفاده شده که خود بر شکست‌های سیستم تاثیرگذار خواهد بود. لازم

به توضیح می‌باشد که شکست‌های سیستم، شامل فرصت از دست رفته است که در قالب کاهش نرخ تولید و یا ریسک ناشی از عدم امکان دسترسی به سیستم تعریف شده است. به عبارت دیگر اساس حلقه‌های بازخور در مدل بر مبنای ارتباط بین برنامه‌های نگهداری پیشگیرانه و شکست‌ها مدلسازی شده است. در ادامه تاثیر دیگر پارامترها همچون ارتقاء تکنولوژی، یادگیری و عمر نیز به مدل اضافه شده است. غیر از پارامترها و متغیرهای فوق، مابقی مدل شامل فرمول‌های حسابداری است که هزینه چرخه عمر را محاسبه می‌کند بایستی توجه داشت که این مدل بیشتر واکنشی است تا پیشگیرانه. اقدامات نگهداری پیشگیرانه در هر مقطع زمانی وابسته به شکست‌های تجمعی دوره قبل می‌باشد. بر اساس سیاست‌ها و عملکرد مورد انتظار سیستم، پارامترهای مدل تعیین شده و شبیه‌سازی پارامترها در دامنه‌ای مشخص انجام می‌شود. این مدل با استفاده از VENSIM ویرایش ۱/۶۲ و C++ برنامه‌نویسی شده است. تحقیق حاضر در شرکت‌های خودروسازی انجام شده و از میان انواع خطوط تولیدی براساس دو عامل تنوع محصول و وجود رکوردهای مرتبط با خرابی و پایگاه داده، پایلوت جهت پیاده‌سازی مدل پیشنهادی تعیین گردیده است.

پیشینه‌ی تحقیق

پویایی سیستم توسط «درو» [۵] به عنوان روشی تعریف شده که مشخصه‌های بازخور اطلاعاتی سیستم‌های پویا را ارائه می‌دهد که بر این مبنا چگونگی ساختار، سیاست‌ها و تصمیمات مشخص خواهد شد. فارستر مدل «پویایی صنعتی» را برای بررسی ارتباط کوتاه مدت دینامیک بین سطوح موجودی و نرخ تولید توسعه داد [۱۹]. «ماتیاس و هامگرن» [۷] یک مدل شبیه‌سازی را به منظور ایجاد سیستم پشتیبانی تصمیم ارائه داده‌اند که برای برنامه‌ریزی، ساخت، نگهداری و مدیریت زیرساخت‌ها در طول چرخه عمر مورد استفاده قرار می‌گیرد. «اوگاملانا» [۱۷] از پویایی سیستم در مدیریت پروژه‌های عمرانی استفاده کرده است. مدل وی چهار سیستم فرعی: منابع انسانی، طراحی تولید، کنترل و برنامه‌ریزی را دربر دارد. «رودریگز و باورز» [۱۹] از پویایی سیستم برای مدلسازی مدیریت پروژه استفاده نموده‌اند. «کیوی جاروی و سوسیما» [۱۲] با استفاده از مفهوم پویایی سیستم برای مسائلی که دارای مقادیر حدی دونقطه‌ای می‌باشند (مسائلی که متغیرهای سطح دارای

مقادیر ثابت اولیه و نهایی هستند) مدل جدیدی را ارائه دادند. «کویل و گـاردینر» [۴] یـک مدل سیستم پویا را بمنظور برنامه نگهداری و عملیات زیردریاییهـا ارائـه دادنـد, مـدل آنهـا متمرکز بر قابلیت دسترسی و نرخ استفاده در طول چرخـه عمـر سـرویس‌دهـی زیردریاییهـا بود. سیستم بازخوری که در مدل آنها مورد استفاده قرار می گیرد، به تحلیـل رفتـار پویـای سیستم کمک کرده و چگونگی برطرف نمودن نیازهای عملیاتی را بررسی مینماید. عـلاوه بر این، مدل پیشنهادی آنان سیاست‌های تـصمیم‌گیـری را کـه متکـی بـر مـشکلات سیـستم هـستند را ارزیـابی مـی‌نمایـد، (ماننـدتأخیر در فرآینـد نگهـداری زیردریـایی‌هـا بـه دلیـل سرویس‌دهی آنها هنگام نیاز). ماهیت گسسته و اتفاقی بودن مدل این تحقیق برگرفتـه شـده از مدل کویل و گاردینر میباشد که نشان دهنـدهٔ ایـن اسـت کـه مـدل سیـستم پویـا میتوانـد هنگامی که شبیه‌سازی بصورت پیوسته است با فرض تصادفی یا گسسته مورد اسـتفاده قـرار گیرد.

چارچوب نظری مدل

این متدولوژی توسط پروفسور جـی فارسـتر از دانـشگاه ام. آی. تـی توسـعه‌یافـت [۴]، وی معتقد است که هر سیستم پویا که در طول زمان دگرگـون مـی شـود یـک سـاختار سلـسله مراتبی چهارگانه دارد و می‌توان برای هـر تحـول پویـایی در پدیـده هـای گونـاگون چنـین ساختاری را ارائه کرد، اعم از این که سیستم پویـا در زمینـه مهندسـی، اقتـصاد، مـدیریت و غیره باشد. با استفاده از الگوی ارائه شده توسط این نظریه می توان علت پویـایی سیـستم را توضیح داد. در واقع با استفاده از ساختار سلسله مراتبـی مزبـور مـی‌تـوان فرمـول رفتـار هـر پدیده ای را تعیین نمود [۱۶] [۱۵] [۱].

فارستر معتقد است که هر سیستم پویا که در طول زمان دگرگون میشود از یک ساختار سلسله مراتبی چهارگانـه تـشکیل شـده اسـت و میتـوان بـرای هـر نـوع تحـول و پویـایی در پدیده‌های گوناگون چنـین سـاختاری را ارائـه نمـود، اعـم از اینکـه سیـستم پویـا در زمینـه مهندسی، اقتصاد، مدیریت، طبیعت، فیزیـک، روانـشناسی و غیـره باشـد. بـا اسـتفاده از ایـن نظریه، میتوان علت پویایی سیستم را توضیح داد؛ مثلاً رشد شایعه در اجتماع، رشد جمعیت، رشد یک گلوله برفی که از کوهستان سرازیر میشود، رشد نارضایتی در یـک سـازمان کـه همگی از یک الگوی واحد پیروی میکننـد و میتـوان بـا اسـتفاده از سـاختار سلـسله مراتبـی

مزبور رفتار آنها را پیش‌بینی کرد [۱]. این ساختار سلسله مراتبی دارای چهار رکن است:

۱. محدودهٔ بسته
۲. حلقه‌های بازخور
۳. متغیرهای سطح یا حالت
۴. متغیرهای نرخ

چهارچوب مدل پیشنهادی

حال به دنبال ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری می‌باشیم که بتواند سیستم‌های با عمر سرویس دهی طولانی (پانزده سال یا بیشتر) و هزینه نگهداری بالا را پشتیبانی کند، که در این راستا برخی متغیر های کلیدی همچون بهبود تکنولوژی، تجربه پرسنل، نگهداری پیشگیرانه وارد مدل شده اند. این عوامل بر خرابی‌ها و هزینه چرخه عمر سیستم همچون هزینه عملیاتی سالیانه و سرمایه‌گذاری اولیه تأثیر می‌گذارند. مدل پیشنهادی، یک مدل عمومی بوده و شامل پارامترهای حیاتی سیستم مانند نرخ خرابی، اثربخشی نگهداری پیشگیرانه، عامل یادگیری و دیگر پارامترهای مرتبط میباشد. این مدل ممکن است برای سیستم‌هایی استفاده شود که دارای چرخهٔ عریض و طویل سرویس‌دهی باشند. مدل ارائه شده بر مشکل اصلی هر سیستم نگهداری که همانا متوازن ساختن هزینه خرابی‌ها و هزینه‌های فرصت از دست رفته با هزینهٔ نگهداری پیشگیرانه است، تاکید دارد. به طور کلی عقیده بر این است که باید سیاست نگهداری پیشگیرانه را براساس پیش‌بینی فرصت از دست رفته (بر پایه سوابق گذشته سیستم) تعیین نماییم. در این تحقیق از روش میانگین ساده دوره‌های گذشته برای پیش‌بینی و تعیین فرصت‌های از دست رفته مورد انتظار در دوره‌های بعد, استفاده می‌شود. [۱۷] از آن‌جایی که تمرکز بر توسعه متدولوژی سیاست نگهداری انعطاف‌پذیر میباشد، از روش میانگین ساده برای پیش‌بینی خرابی‌های آینده استفاده شده است. هم‌چنین حاصل جمع هزینه‌های عملیاتی، هزینه نگهداری اصلاحی سالیانه، هزینه نگهداری پیشگیرانه و هزینهٔ بهبود تکنولوژیکی، هزینهٔ کل سالیانه را تشکیل میدهند. حاصل جمع هزینه‌های سالیانه، هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های مصرفی، هزینه کل چرخه عمر یک سیستم را بدست خواهد داد.

برخی اصول به کار گرفته شده در مدل

۱. خرابی‌هایی که در هر دورهٔ زمانی t رخ میدهند تحت تأثیر شمار فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه‌ای است که در دورهٔ قبلی انجام گرفته است.
۲. خرابی‌ها در واقع بطور اتفاقی رخ میدهند. توزیع‌نمائی در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.
۳. خرابی ها بر سطح بهبود تکنولوژی و عمر سیستم بر خرابی‌ها تأثیرگذار می‌باشند.
۴. یادگیری بر نرخ خرابی‌ها تأثیرگذار میباشد.
۵. شمار فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه در خلال دوره زمانی t، تحت تأثیر میانگین فرصت از دست رفته (یا میانگین شمار خرابی‌ها) دوره قبل میباشند.
۶. هنگامی که سیستمی درگیر فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه میگردد، فرصت از دست رفته نخواهد داشت چرا که این سیستم از کار نمیافتد و این نوع فعالیتها (نگهداری پیشگیرانه) در مرحله برنامه‌ریزی لحاظ شده‌اند.
۷. تأثیر خرابی‌ها بر هزینه عملیاتی (هزینه‌های مستقیم) نسبت به هزینه فرصت از دست رفته (از دست دادن تولید) قابل ملاحظه نبوده و عموماً در نظر گرفته نمی‌شوند.

متغیرها، پارامترها

متغیرها و پارامترهای مورد استفاده در مدل در قسمت زیر توضیح داده شده است. لازم به توضیح است، هنگامی‌که یک سیستم پیچیده با استفاده از معادلات دینامو توصیف می‌شوند از متغیرهای کمکی به منظور کاهش پیچیدگی معادلات متغیرهای نرخ و سطح استفاده می‌شود که این امر فهم سیستم را تسهیل خواهد کرد [۲۲]، از اینرو از اصل فوق در مدلسازی استفاده شده است.

۱. پارامترها

پارامترها مقادیر مشخصی هستند که از سوابق گذشته یا تجربیات قبلی بدست میآیند و برای تشریح خصوصیات سیستم کاربرد دارند، هر پارامتری که در ادامه به آن اشاره می‌شود، می‌تواند برای آزمون سیاستها و سناریوهای مختلف، مورد استفاده قرار گیرد.

- میزان بحرانی بودن مأموریت سیستم

- تاثیر نگهداری پیشگیرانه بر خرابی‌ها
- تاثیر عمر بر خرابی‌ها
- متوسط زیان هر خرابی
- برنامهٔ نگهداری پیشگیرانه سال اول
- حداکثر نگهداری پیشگیرانه مجاز
- تاثیر بهبود تکنولوژی بر خرابی‌ها
- حداکثر نرخ مجاز خرابی‌ها
- هزینه نگهداری هر خرابی
- هزینه نگهداری پیشگیرانه
- هزینه‌های عملیاتی سالیانه
- تورم
- نرخ وام
- نرخ مالیات بر درآمد
- تاثیر هزینه چرخه عمر بر هزینهٔ کل سالیانه
- ارزش اسقاط
- سرمایه‌گذاری اولیه
- توان(نمایه) منحنی یادگیری

این عامل براساس سطح مهارت نیروی کار تنظیم می شود. [۱۳]

$$b = \log_{10}(\text{learning}) / \log_{10}(2)$$

$\log_{10}$ = لگاریتم در مبنای ۱۰ و learning منحنی یادگیری مورد استفاده در مدل می باشد.

- سفارش مجدد
- ذخیره اطمینان
- پارامتر اثر یادگیری

این پارامتر میتواند در محاسبه اثر یادگیری ایفای نقش نموده و نسبت بین منابع (زمان، پول) مورد نیاز برای فعالیتiام نسبت به منابع مورد نیاز برای اولین فعالیت می باشد.

هنگامی که تعداد فعالیت‌های نگهداری ناقص کاهش میابد، تعداد خرابی‌های سیستم نیز کاهش خواهد یافت.

پارامتر اثر یادگیری = Pow (t, b) (i.e , t to the power of b)

۲. متغیرها

متغیرها تابعی از زمان (یا دیگر متغیرها) بوده و ارزش آنها در طول زمان تغییر میابد.

۱-۲. متغیرهای نرخ

- **تعداد فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه هر دوره:**

این متغیر یکی از مهمترین متغیرهای مدل بوده و نشان دهندهٔ تعداد فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه مورد نیاز در دوره بعدی می‌باشد. برای معادله این متغیر میتوان یک حد بالا و یک حد پایین برای فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه معرفی نمود [۱۰]. محاسبهٔ این پارامتر با در نظر گرفتن بحرانی بودن مأموریت و فرصت از دست رفته‌ای که در خلال دوره گذشته در اثر خرابی‌ها رخ داده است، انجام میشود.

(فرصت از دست رفته در دوره t) × (بحرانی بودن مأموریت)= تعداد فعالیت‌های نگهداری در دوره t+1

در اینجا t زمان سپری شده در شبیه‌سازی می‌باشد.

- **تعداد فعالیت‌های نگهداری اصلاحی در هر دوره:**

در مدل سیستم پویا این متغیر، متغیر سطح "فرصت از دست رفته" بوده و یک متغیر تصادفی در نظر گرفته می شود. فرض اساسی مدل این است که هر خرابی با یک فرصت از دست رفته مرتبط بوده و تعداد خرابی‌ها اگرچه تصادفی می‌باشند ولی متأثر از فاکتورهایی مانند فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه در دورهٔ گذشته و همچنین اثرات یادگیری هستند.

عدد تصادفی تولید شده (توزیع نمایی)-(تعداد برنامه پیشگیرانه دوره t) × (تاثیر نگهداری پیشگیرانه بر خرابی‌ها) × (تعداد فعالیت‌های نگهداری اصلاحی در دوره t+۱)= ضریب یادگیری

- **میانگین نرخ شکست:**

این پارامتر نشان دهندهٔ میانگین نرخ خرابی‌ها ی سیستم می‌باشد که انتظار می رود در هر

دوره رخ دهد. بهبود سطح تکنولوژی و عمر سیستم بر این پارامتر تأثیرگذار بوده و نرخ خرابی مورد انتظار در اولین دوره (یا دوره‌های ابتدایی) یکی از مشخصه‌های سیستم می‌باشد که توسط سازنده مشخص می‌شود.

میانگین نرخ شکست اولین دوره (۱ + تاثیر عمر به خرابی‌ها در دوره t) (۱ - تاثیر بهبود تکنولوژی بر خرابی‌ها)= میانگین نرخ شکست

تعداد خرابی‌ها در دوره t × سفارش مجدد+ ذخیره احتیاطی = قطعات یدکی مورد نیاز

- **بهبود تکنولوژی:**

خروجی مدل پیش‌بینی تکنولوژی را میتوانیم بعنوان یک داده برای مدل سیستم پویا در نظر بگیریم. خروجی این متغیر باید ارزش پولی بهبود سطح تکنولوژی را نشان دهد. علاوه بر تعیین وجوه مشخصه تکنولوژی بایستی هزینه‌های مرتبط نیز پیش‌بینی شوند [۲۰].

- **هزینه معادل کل سالیانه:**

این متغیر هزینه کل سالیانه شامل هزینه عملیاتی، هزینه نگهداری و بهبود تکنولوژی سیستم مورد نظر می‌باشد. همچنین تأثیر تورم نیز در نظر گرفته میشود. نرخ بهره در معادله به صورت ضریب می‌باشد که ارزش جاری معادل هزینه کل سالیانه را محاسبه مینماید.

(هزینه عملیاتی + هزینه خرابی در دورهt + هزینه نگهداری پیشگیرانه در دورهt + بهبود تکنولوژی در دوره t+ (تعداد خرابی‌های دورهt × متوسط زیان هر خرابی + موجودی × هزینه سرمایه)) + (۱+ نرخ تورم)= هزینه کل سالانه دوره t

- **هزینه کل سالیانه نگهداری پیشگیرانه:**

این متغیر هزینه ای است که در خلال یک سال بابت نگهداری پیشگیرانه، صرف میشود.

تعداد نگهداری پیشگیرانه × دوره t× هزینه هر برنامه نگهداری پیشگیرانه = هزینه سالیانه نگهداری پیشگیرانه در دوره t

- **هزینه کل سالیانه خرابی‌ها:**

این متغیر هزینه سالیانهای است که بابت اصلاح خرابی‌هاصرف می‌شود.

تعداد نگهداری پیشگیرانه× دوره t× هزینه هر برنامه نگهداری پیشگیرانه = هزینه سالیانه نگهداری پیشگیرانه در دوره t

۲ـ۲. متغیرهای سطح (یا وضعیت)

در ادامه چهار متغیر معرفی میگردند که متغیرهای سطح بکار رفته در مدل سیستم پویا بوده و در واقع این متغیرها نمایانگر انباشتگی هستند.

- **فرصت از دست رفته:**

این متغیر زیانی است که بواسطهٔ خرابی‌ها ، فروش از دست رفته و همچنین زیان هزینه‌های مستقیم ایجاد شده در خلال خرابی (حقوق پرداخت شده در خلال خرابی به کارگران) و دیگر زیانها همچون زیان ناشی از عدم تحویل به موقع جنس به مشتری به سازمان وارد میشود.

(فرصت از دست رفته در دوره t-۱)+ (تعداد خرابی‌های دوره t × (متوسط زیان هر خرابی) + (موجودی × هزینه سرمایه)=فرصت از دست رفته در دوره t

- **نگهداری اصلاحی تجمعی**

این متغیر اشاره دارد بر کل تعداد خرابی‌ها یی که در خلال چرخهٔ عمر سیستم رخ میدهند. هنگامی که نرخ خرابی‌ها از مقدار حداکثر خود تجاوز نماید، این متغیرضرورت بهبود تکنولوژی را اعلام می‌دارد.

تعداد خرابی‌های تجمعی در دوره t= (تعداد خرابی‌های تجمعی در دوره t -۱) – (تعداد خرابی‌های دوره t)

- **نگهداری پیشگیرانه تجمعی**

این متغیر تعداد فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه ای است که در طول دوره عملیاتی انجام می گیرد.

نگهداری پیشگیرانه تجمعی در دوره t = نگهداری پیشگیرانه در دوره t -۱- تعداد نگهداری پیشگیرانه تجمعی در دوره t

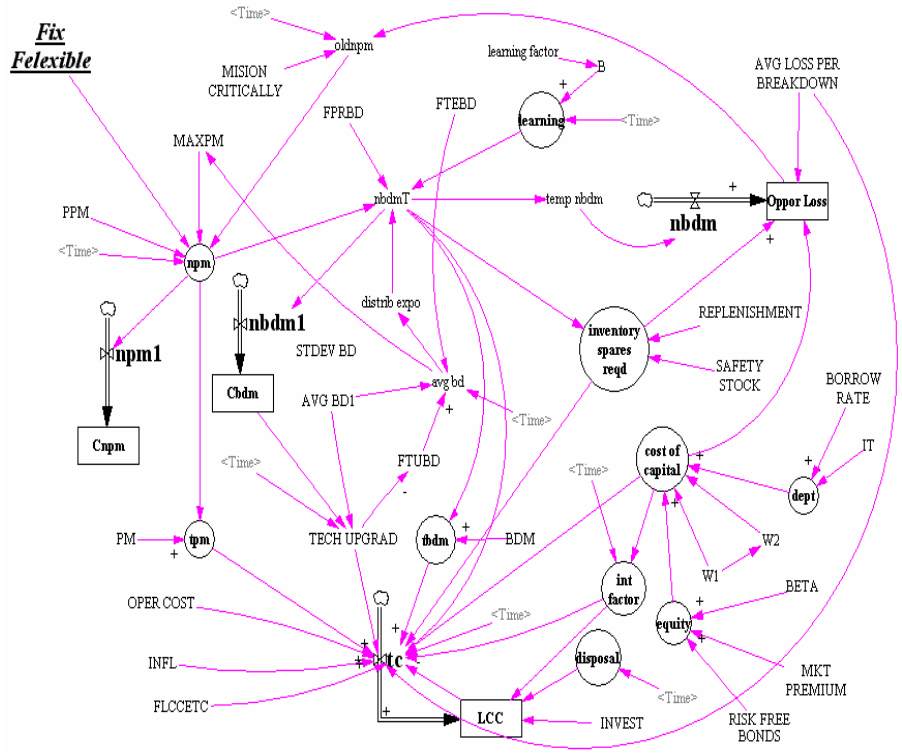
هزینه چرخه عمر

این متغیر مجموع هزینه‌های انجام گرفته در خلال چرخه عمر یک سیستم میباشد که شامل: سرمایه گذاری اولیه، هزینه سالیانه عملیاتی، هزینه نگهداری و... در پایان دوره عمر عملیاتی میباشد. این متغیر معیاری کاربردی برای تعیین سیاست نگهداری پیشگیرانه سیستم

می‌باشد. [۲۱]

هزینه چرخه عمر در دورهt = هزینه چرخه عمر در دوره t – ۱+ هزینه سالیانه t – ارزش اسقاط × n(بهره + ۱)

نمودار ۱بیان گر طرح تفضیلی مدل میباشد. تمام متغیرها و پارامترهای استفاده شده در مدل در اینجا نشان داده شده است (برای مثال، هزینه کل سالیانه برای هر سیستمی مساوی است با جمع هزینه‌های کل سالیانه فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه و نگهداری تعمیرات، هزینه بهبود تکنولوژی و هزینه‌های عملیاتی) تورم و درصورتی‌که در مجموع آن ضرب نماییم، ارائه کنندهٔ هزینه کل سالیانه میشود. علامت مثبت روی هر پیکان که بین دو متغیر رسم شده است نشاندهندهٔ تأثیر مثبت یک متغیر و علامت منفی نشانگر تأثیر منفی یک متغیر بر متغیر دیگر میباشد. مدل پیشنهادی یک مدل نگهداری انطباقی میباشد که تلاش مینماید تعداد فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه دوره بعد را با توجه به تعداد خرابی‌ها ی دوره قبل تنظیم نماید. [۸] [۱۱]



نمودار ۱. طرح تفضیلی مدل پیشنهادی

شبیه‌سازی و کاربرد مدل

این مدل برای تأیید اعتبار نتایج سیستم‌های مکانیکی و الکترونیکی بکار گرفته شده است. مدل پیشنهادی در این مقاله برای یک سیستم با پارامترهای مقداری دقیق، با توجه سیاست‌های نگهداری ثابت و متغیر شبیه‌سازی شده است [۱۶] و نتایج آورده شده است. سیستمی که در این تحقیق مدنظر است دارای چرخه عمر ۱۵ ساله بوده، سرمایه‌گذاری اولیه آن ۱۰۰۰ واحد پول ، نرخ خرابی مورد انتظار برای سال اول ۱۰۰ ، نرخ یادگیری ۹۵٪، میانگین هزینه فعالیت نگهداری پیشگیرانه ۱۵ واحد پول ، هزینه متوسط فعالیت نگهداری خرابی یا تعمیر ۱۲ واحد پول ، هزینه عملیاتی (هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم به استثنای هزینه نگهداری) در هر سال ۱۰۰ واحد پول و فرصت از دست رفته هر خرابی ۲۰ واحد پول منظور شده است. که میتوان آن را برحسب ساعات از دست رفته در خلال نگهداری اصلاحی یا تعمیر تعریف نمود که این امر باز میگردد به میانگین زمان تعمیرات (MTTR) نگهداری که در نرخ سود از دست رفته هر واحد زمان ضرب میشود. ذخیره اطمینان موجودی انبار به ذخیره‌ای با ارزش ۱۵ واحد پول احتیاج دارد و میانگین مواد مصرفی برای هر تعمیر ۵ واحد پول است. برای خرابی‌ها یک توزیع نمایی در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که عامل نگهداری پیشگیرانه خرابی‌ها را ۷/ . کاهش می‌دهد. زمان نیز بر خرابی‌ها تأثیر میگذارد که میزان این تأثیر ۱/ . میباشد به عبارت دیگر میانگین نرخ خرابی در هر سال ۱۰٪ افزایش میابد. ضریب اهمیت این سیستم برپایه ۳/ . تنظیم میشود به عبارت دیگر یک فعالیت نگهداری پیشگیرانه هنگامی که میانگین فرصت از دست رفته تجمعی به ۳ واحد برسد، انجام میشود. فرض میشود ارتقاء تجهیز هنگامی رخ دهد که میانگین نرخ خرابی از حد مجاز خود تجاوز نموده و جدا از این ارتقاء تجهیز میتواند هر ۵ سال یکبار انجام گیرد. تجزیه و تحلیل حساسیت برخی پارامترهای خاص مدل، مورد آزمایش قرار گرفته و تجزیه و تحلیل حساسیت به جهت تعیین انحراف خروجی مدل در قیاس با تغییرات پارامترهای تخمین زده شده، انجام گرفته است. مطالعهٔ این پارامترها بواسطه ذهنی بودن آنها حائز اهمیت میباشد. تجزیه و تحلیل حساسیت برای مقادیر مختلف پارامترها، در ذیل آورده شده است.

فاکتور نگهداری پیشگیرانه که خرابی‌ها را کاهش میدهد = ۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵

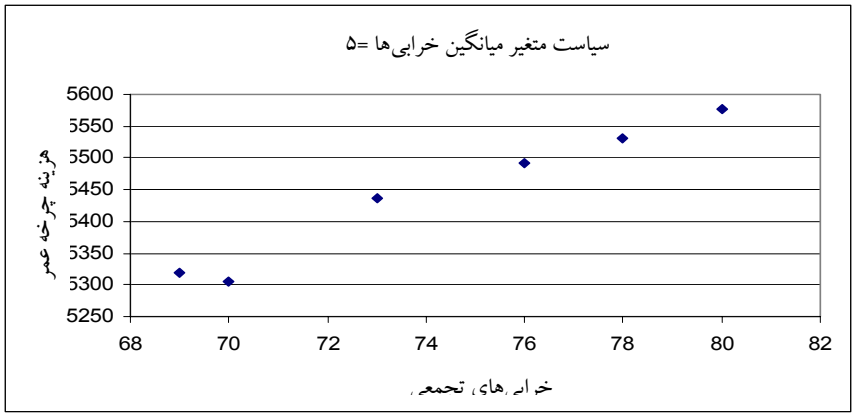
عامل زمان که بر خرابی‌ها تأثیر میگذارد = ۰/۴، ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱

زیان هر خرابی = ۹۵، ۸۰، ۶۵، ۵۰، ۳۵، ۲۰، ۵

ضریب یادگیری = ٪۹۰، ٪۷۰، ٪۵۰

تجزیه و تحلیل محاسبه هزینه چرخه عمر

رویهٔ ذیل ممکن است برای تعیین سیاست نگهداری سال اول مورد استفاده قرار گیرد ، البته به این مطلب باید توجه نمود که چنین رویه‌ای در صورتیکه هزینه چرخه عمر ، مجموع هزینه‌های اتفاق افتاده در چرخه عمر سیستم بوده و فرصتهای از دست رفته محاسبه نشده باشد ، میتواند مفید باشد اما اگر فرصت از دست رفته در محاسبات چرخه عمر لحاظ شده باشد ، رویه‌ای که در ذیل توضیح داده خواهد شد، لازم نخواهد بود . همانطور که در ابتدا اشاره شد، این مدل برای راه‌اندازی توسط کاربر نیازمند سیاست سال اول ($t = 0$) است. برای تعیین سیاست‌های سال‌های بعدی از حلقه بازخور برمبنای عملکرد گذشته استفاده میشود. نمودار خرابی‌های تجمعی بر حسب هزینه چرخه عمر ترسیم شده، سپس نقاط برجسته به منظور تجزیه و تحلیل بیشتر انتخاب شده و سیاست اصلی انتخاب آن نقاطی در نمودار میباشد که ترکیب مناسبی از خرابی‌های تجمعی و هزینه چرخه عمر را ارائه نمایند. ترکیب مناسب از خرابی‌های تجمعی و هزینه چرخه عمر ، ترکیبی است که ارائه کنندهٔ خرابی‌های تجمعی پایین‌تر در مقایسه با تمام ترکیبات با هزینه چرخه عمرهای مشابه بوده و یا اینکه در مقایسه با دیگر حالات خرابی‌های تجمعی، دارای هزینه چرخه عمر پایین‌تر باشد (نمودار ۱).



نمودار ۱. سیاست متغیر، میانگین خرابی=۵

برای مثال، میانگین نرخ خرابی در ۵ سال اول را در نظر بگیرید، در اینجا انتخابهای بهتر عبارتند از (۵۳۱۸،۶۹) و (۵۳۰۵، ۷۰) یا مقادیر نگهداری پیشگیرانه برنامه ریزی شده برای سال اول سیاست‌های نگهداری پیشگیرانه ۱ و ۴ می‌باشند. هزینه چرخه عمری که توسط تعداد ۷۰ خرابی ایجاد شده است کمتر از آن مقدار با تعداد ۶۹ خرابی میباشد. لذا حالت (۵۳۰۵، ۷۰) که تعداد خرابی ۷۰ را ارائه میدهد ، بر سایر سیاستها برتری دارد زیرا ارائه کننده هزینه چرخه عمر پایین‌تر با تعداد خرابی تجمعی کمتر میباشد.

در مثالی که در نگاره ذیل آمده است، برای سیاست ۱ فعالیت نگهداری پیشگیرانه در سال اول، انتظار می رود هزینه چرخه عمر برابر با ۵۳۱۸ واحد پول شود و خرابی‌های تجمعی منجر به از دست دادن فرصتی معادل ۱۴۱۳ واحد پول شده و لذا ضروریست به تعداد ۱۱۰ فعالیت نگهداری پیشگیرانه در خلال ۱۵ سال عمر سرویس‌دهی صورت پذیرد .

نگاره ۲ شبیه‌سازی نتایج برای یک نرخ میانگین خرابی برابر با ۵ در سال اول (برای خرابیهایی که در خلال چرخه عمر سیستم رخ میدهند، توزیع نمایی در نظر گرفته شده است).

نگاره ۲. شبیه‌سازی نتایج برای یک نرخ میانگین خرابی

انتخاب مناسب	lcc	Sum OL	Sum PM	Sum BD	PM1
۱ , ۴	۵۴۹۲	۱۵۶۳	۱۱۰	۷۶	۰
	۵۳۱۸	۱۴۱۳	۱۱۰	۶۹	۱
	۵۴۳۶	۱۵۰۱	۱۱۰	۷۳	۲
	۵۵۷۷	۱۶۴۳	۱۱۰	۸۰	۳
	۵۳۰۵	۱۴۲۶	۱۱۰	۷۰	۴
	۵۵۳۱	۱۵۸۷	۱۱۱	۷۸	۵

که در آن:

PM1 : تعداد نگهداری پیشگیرانه سال اول

Sum BD : تعداد تجمعی خرابی‌ها

Sum PM : تعداد تجمعی اقدامات نگهداری پیشگیرانه

Sum OL : تعداد تجمعی فرصت‌های از دست رفته

LCC : هزینه چرخه عمر

براساس نظر مدیریت نگهداری نسبت به افزایش خرابی‌ها یا افزایش هزینه چرخه عمر یک سیستم، ممکن است برای سال اول یک سیاست نگهداری ویژه انتخاب گردد.

در مثال فوق اگر هدف به حداقل رساندن خرابی‌های تجمعی باشد باید سیاست نگهداری پیشگیرانه ۱ انتخاب گردد و اگر هدف حداقل کردن هزینه چرخه عمر باشد ، باید سیاست نگهداری پیشگیرانه ۴ انتخاب گردد . مصالحه یا نقطه سر به سر بین هزینه چرخه عمر و خرابی‌های تجمعی با استفاده از محاسبه نسبت هزینه چرخه عمر به تغییرات در خرابی‌ها تعیین میگردد.(هزینه نهایی) که نشانگر مقدار پول اضافی مورد نیاز برای کاهش تعداد خرابی‌ها می باشد (توسط سیاست نوع ۱). اگر این مقدار کمتر از میانگین زیان هر خرابی باشد ، سیاست حاوی خرابی‌های تجمعی کمتر باید انتخاب شود. در مثال بالا با بکارگیری سیاست ۱ ، با کاهشی در خرابی‌های تجمعی مواجه هستیم که منجر به افزایش در هزینه چرخه عمر به اندازه ۱۳ واحد پول یا افزایش به میزان ۱۳ واحد پول برای هر کاهش در خرابی‌های تجمعی میشود. از آنجائیکه این مقدار پایین‌تر از مقدار میانگین زیان هر خرابی میباشد، برای این سیستم انتخاب یک سیاست نگهداری پیشگیرانه با خرابی‌های تجمعی پایین‌تر پیشنهاد میگردد (به عبارت دیگر، نگهداری پیشگیرانه برنامه‌ریزی شده نوع ۱).

نگاره ۲. نتایج سیاست‌های ثابت و متغیر برای عامل عمر برابر۵/ .

تفاوت در هزینه چرخه عمر	تفاوت در خرابیها	فعالیت نگهداری پیشگیرانه در سال ۱
۲۰۲۴۴	-۱۹۵۸	۰
۱۶۸۳۵	-۱۹۶۷	۱۰
۱۳۶۵۴	-۲۰۹۵	۲۰
۱۷۱۵۶	-۱۹۰۰	۳۰
۲۶۳۹۶	-۱۴۲۳	۴۰
۱۹۸۹۵	-۱۶۲۶	۵۰
۱۵۵۲۲	-۱۶۶۸	۶۰
۱۸۱۷۵	-۱۶۰۰	۷۰
۲۱۳۱	-۲۱۹۵	۸۰
۱۷۰۳۳	-۱۴۹۹	۹۰
۵۹۹۰	-۱۸۱۴	۱۰۰

مقایسه بین سیاست نگهداری ثابت و متغیر

در این بخش مقایسه بین سیاست نگهداری ثابت و متغیر، در قالب نگاره‌ها آورده شده است. پارامترهای مورد استفاده در قسمت قبل اشاره گردیده است.

نگاره ۳. نتایج سیاست نگهداری متغیر با فاکتور عمر برابر ۰/۵ .

هزینه چرخه عمر	خرابی‌های تجمعی	فعالیت نگهداری پیشگیرانه در سال ۱
۱۷۴۲۴۴	۴۱۴۵	۰
۱۷۲۶۱۰	۴۱۵۰	۱۰
۱۶۲۱۲۸	۳۶۷۷	۲۰
۱۷۱۰۴۰	۴۰۲۹	۳۰
۱۷۳۸۵۲	۴۱۴۹	۴۰
۱۷۳۸۴۳	۴۱۳۹	۵۰
۱۷۰۳۳۲	۴۰۰۲	۶۰
۱۶۸۰۵۵	۳۸۶۰	۷۰
۱۶۳۸۵۲	۳۷۲۶	۸۰
۱۷۱۵۲۷	۴۰۵۸	۹۰
۱۶۱۱۷۹	۳۶۳۹	۱۰۰

نگاره ۴. نتایج سیاست نگهداری ثابت با فاکتور عمر برابر ۰/۵ .

هزینه چرخه عمر	خرابی‌های تجمعی	فعالیت نگهداری پیشگیرانه در سال ۱
۱۵۴۰۰۰	۶۱۰۳	۰
۱۵۵۷۷۵	۶۱۱۷	۱۰
۱۴۸۴۷۴	۵۷۷۲	۲۰
۱۵۳۸۸۴	۵۹۲۹	۳۰
۱۴۷۴۵۶	۵۵۷۲	۴۰
۱۵۳۹۴۸	۵۷۶۵	۵۰
۱۵۴۸۱۰	۵۶۷۰	۶۰
۱۴۹۸۸۰	۵۴۶۰	۷۰
۱۶۱۷۲۱	۵۹۲۱	۸۰
۱۵۴۴۹۴	۵۵۵۷	۹۰
۱۵۵۱۸۹	۵۴۵۳	۱۰۰

شبیه سازی برای منحنی یادگیری ۷۵٪ و ۱۰۰٪ ، عامل عمر ۰ و ۰/۵ (یعنی عمر زیاد یا هیچ تأثیری بر خرابی‌ها ندارد و یا باعث افزایش ۵۰ درصد در نرخ خرابی‌ها می‌شود)

انجام گرفته است. این دو مقدار میتوانند نشانگر وضعیت بی نهایت در هر سیستمی باشند. نتایج نشانگر این نکته است که سیاست نگهداری ارائه کننده تعداد خرابی‌های تجمعی پایین‌تر در مقایسه با سیاست نگهداری ثابت میباشد. در بعضی موارد میتوان مشاهده نمود که هزینه چرخه عمر برای سیاست نگهداری ثابت از هزینه چرخه عمر برای سیاست نگهداری متغیر، کمتر میباشد اما خرابی‌های تجمعی آن بیشتر است (نمودار ۲).

نمودار ۲. سیاست متغیر در مقابل ثابت (هزینه چرخه عمر)

این مورد ما را به بررسی موضوع مهم دیگری هدایت مینماید که همانا استفاده از هزینه چرخه عمر بعنوان معیاری برای ارزیابی سیاست نگهداری میباشد . اینکه سیاست نگهداری را برمبنای هزینه چرخه عمر تنظیم نماییم، ممکن است مناسب نباشد ، بلکه شاید لازم باشد فرصت از دست رفته هم در نظر گرفته شود. حتی اگر میزان فرصت از دست رفته تعیین شده و به محاسبات هزینه چرخه عمر اضافه شود باز هم بایستی به این مطلب توجه نمود که تنزیل جریانات نقدی آینده ممکن است، افزایش فرصت از دست رفته را که در آینده رخ خواهد داد را پنهان سازد. اختلاف بین خرابی‌ها و هزینه چرخه عمر در سیاست‌های ثابت و متغیر نگهداری به صورت جدول بندی در صفحه بعد آورده شده است که در آن تأثیر عامل زمان برخرابی‌ها۵/. میباشد به عبارت دیگر، سالانه ۵۰٪ افزایش در نرخ خرابی‌ها داریم. برای مثال، نتیجهٔ داشتن ۳۰ فعالیت نگهداری پیشگیرانه در سال۱ را در نظر بگیرید

(نمودار ۳). برای یک سیاست نگهداری ثابت، با ۳۰ فعالیت نگهداری پیشگیرانه در سال، خرابی‌های تجمعی در حدود ۴۷٪ بیشتر از همان مقدار تحت سیاست نگهداری متغیر میباشد، در حالیکه هزینه چرخه عمر در حدود ۱۱٪ کمتر خواهد بود. این مطلب نشان‌دهنده این است که اعتماد یا تکیه کردن بر هزینه چرخه عمر به تنهایی معیاری مناسب جهت انتخاب سیاست نگهداری بهینه نخواهد بود. در تعیین سیاست نگهداری پیشگیرانه، از آنجائیکه برآورد فرصت از دست رفته ذهنی میباشد باید تجزیه و تحلیل مصالحه بین هزینه / خرابی انجام گیرد. نگه داشتن سرمایه در انبار (در قالب موجودی)، اگر زیاد باشد، میتواند بر فرصت از دست رفته مرتبط با خرابی‌ها تأثیر گذارده و لذا بر انتخاب سیاست نگهداری پیشگیرانه بهینه تاثیرگذار خواهد بود. این تجزیه و تحلیل هنگامی اهمیت خواهد یافت که نرخ بهره وام بالا بوده و یا سطوح موجودی و یا سطح ذخیره اطمینان بالا باشد.

نمودار ۳. سیاست متغیر در مقابل سیاست ثابت با فاکتور عمر ۰/۵ (خرابی‌های تجمعی)

به همین ترتیب با عامل عمر برابر صفر (بدون تاثیر زمان)، مشاهده میشود که برای متناسب و متعادل کردن نیازمندیهای اولیه نگهداری ، سیاست نگهداری پیشگیرانه متغیر ارائه کنندهٔ هزینه چرخه عمر و خرابی‌های تجمعی پایین‌تری نسبت به سیاست نگهداری ثابت می‌باشد. اگر مدیریت تصمیم به اتخاذ سیاست نگهداری پیشگیرانه محافظه‌کارانه

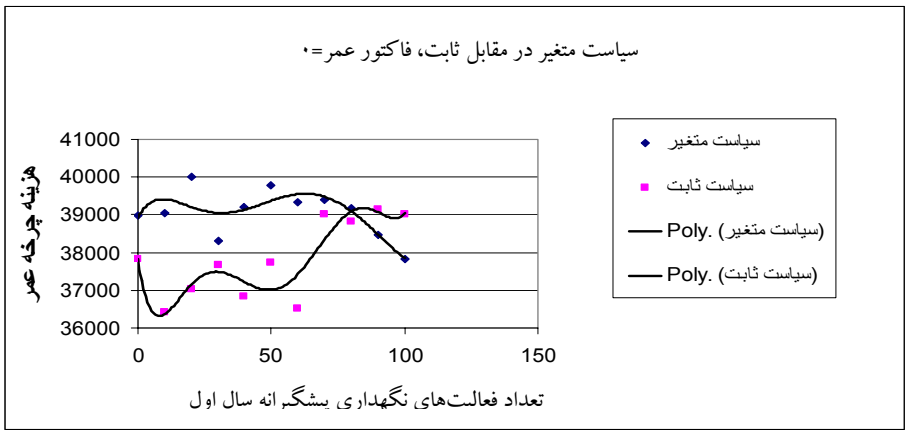
داشته باشد، سازگاری و تطبیق با سیاست نگهداری پیشگیرانه متغیر برمبنای هزینه چرخه عمر و خرابی‌های تجمعی پایین‌تر میتواند انتخاب خوبی باشد. برای نگهداری در سطح بالا لازم است به این نکته توجه شود که ممکن است هر دوی این سیاستها ارائه کنندهٔ هزینه چرخه عمر بسیار مشابه باشند (اختلاف در حدود ۵٪). به‌هرحال، برای فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه بسیار گسترده (نزدیک به حداکثر) سیاست ثابت میتواند خرابی‌های تجمعی کمتری را داشته باشد.

نگاره ۵ نتایج سیاست متغیر بدون توجه به عامل عمر (تأثیرگذاری زمان بر خرابی‌ها صفر میباشد)

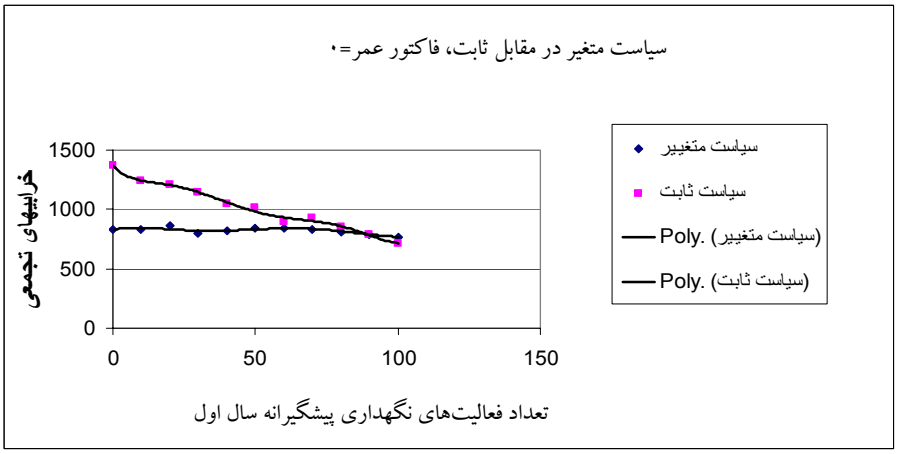
هزینه چرخه عمر	خرابی‌های تجمعی	فعالیت نگهداری پیشگیرانه در سال ۱
۳۸۹۸۷	۸۳۰	۰
۳۹۰۵۴	۸۳۱	۱۰
۳۹۹۹۷	۸۶۳	۲۰
۳۸۳۱۳	۷۹۶	۳۰
۳۹۲۰۱	۸۲۲	۴۰
۳۹۷۶۷	۸۴۳	۵۰
۳۹۳۴۵	۸۳۸	۶۰
۳۹۴۰۹	۸۳۴	۷۰
۳۹۱۶۸	۸۱۴	۸۰
۳۸۴۷۵	۷۹۳	۹۰
۳۷۸۳۹	۷۶۹	۱۰۰

نگاره ۶ نتایج سیاست ثابت بدون توجه به عامل عمر (تأثیرگذاری زمان بر خرابی‌ها صفر میباشد)

هزینه چرخه عمر	خرابی‌های تجمعی	فعالیت نگهداری پیشگیرانه در سال ۱
۳۷۸۲۰	۱۳۶۶	۰
۳۶۴۱۸	۱۲۴۵	۱۰
۳۷۰۱۴	۱۲۰۴	۲۰
۳۷۶۷۸	۱۱۴۶	۳۰
۳۶۸۴۳	۱۰۵۰	۴۰
۳۷۷۴۰	۱۰۱۰	۵۰
۳۶۵۰۷	۸۹۴	۶۰
۳۹۰۱۵	۹۲۸	۷۰
۳۸۸۰۵	۸۴۹	۸۰
۳۹۱۲۸	۷۸۵	۹۰
۳۹۰۲۸	۷۱۷	۱۰۰



نمودار ۴. سیاست متغیر در مقابل ثابت بدون تأثیر مسائل زمان (هزینه چرخه عمر)



نمودار ۵. سیاست متغیر در مقابل ثابت بدون تاثیر عامل زمان (خرابی‌های تجمعی)

از نتایج فوق میتوان این موضوع را استنباط نمود که در مواردی که فاکتور زمان اثر افزایشی بر خرابی‌ها دارد، سیاست متغیر در رسیدن و دستیابی به کاهش در خرابی‌های تجمعی نقش اساسی ایفا نموده و عموماً با توجه به تلرانس خرابی و محدودیت بودجه (هزینه چرخه عمر مورد نظر) سیاست مناسب انتخاب خواهد شد. برای مثال، با توجه به نمودار۳، برای مواردی که عامل عمر در نظر گرفته نمیشود قاعده فوق میتواند برای تعیین سیاست نگهداری مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

فرض کنید برای تعیین سیاست نگهداری ، تعداد خرابی‌های تجمعی بر هزینه چرخه

عمر ترجیح داده شود، البته اختلاف پنج درصدی هزینه چرخه عمر، خیلی برای تعیین سیاست نگهداری، مهم نیست، چرا که هزینه چرخه عمر برای سیاست‌های نگهداری مختلف در یک دامنه پنج درصدی تخمین زده می شود . سپس سیاستی که انتظار می رود ارائه کننده خرابی تجمعی پایینتری باشد ، انتخاب شده و نقطهٔ سر به سر نقطه‌ای است که خرابی‌های تجمعی مورد انتظار هر دو سیاست مشابه یکدیگر باشند.

با توجه به موارد فوق قواعد ذیل در مدل بکار گرفته شده‌اند:

- اگر خرابی‌های تجمعی مورد قبول کمتر از خرابی‌های تجمعی نقطه سر به سر باشد آنگاه سیاست نگهداری ثابت ترجیح داده میشود.
- اگر خرابی‌های تجمعی مورد قبول بیشتر از خرابی‌های تجمعی نقطه سر به سر باشد آنگاه سیاست نگهداری متغیر ترجیح داده خواهد شد.
- هنگامی که هر دو با هم مساوی هستند، آن سیاستی که هزینه چرخه عمر پایینتری دارد، انتخاب میشود.
- سیاست متغیر هنگامی بهتر عمل مینماید که عامل عمر سیستم دارای نرخ رشد بالا باشد. مانند اینکه خرابی‌ها در سیستم‌های مکانیکی (در اثر باز و بست کردن قطعه) زودتر از سیستم‌های الکترونیکی رخ میدهند.
- کاربرد سیاست نگهداری متغیر برای سیستم‌های مکانیکی با عمر خدماتی طولانی مفیدتر از سیستم الکترونیکی است.

هزینه چرخه عمر بعنوان معیاری برای ارزیابی سیاست‌های نگهداری

از نگاره‌های نشان داده شده ، این مطلب را میتوان استنباط نمود که هزینه چرخه عمر می تواند بعنوان معیاری جهت تعیین سیاست نگهداری بهینه مورد استفاده قرار بگیرد و اگر مدیریت پارامترها و اهداف مناسبی تنظیم نکرده باشد، میتواند در تصمیمات دچار اشتباه شود. برای مثال، در بسیاری از شبیه‌سازی‌ها، مشاهده می شود که سیاست‌های مبتنی بر تعداد فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه کمتر ، دارای هزینه چرخه عمر پایین‌تری میباشند، اما فرصت از دست رفته (یا ناکارآمدی سیستم) افزایش پیدا می کند. از آنجایی‌که فرصت از دست رفته به آسانی قابل تعیین نیست، تصمیم‌گیری تنها براساس تخمین هزینه چرخه عمر، روش عملی خوبی نخواهد بود. لذا برخی از تجزیه و تحلیلها که براساس مصالحه بین هزینه چرخه عمر و خرابی‌های تجمعی هستند ، میتوانند کاربرد بیشتری داشته باشند.

در اغلب محاسبات هزینه چرخه عمر، مزایای ناشی از فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه در کاهش فرصت از دست رفتهٔ سیستم در نظر نمی گیرند ، بلکه هزینه‌های رخ داده را در نظر داشته و از صرفه جویی حاصل از کاهش فرصت از دست رفته ، چشم پوشی میکنند ، در صورتیکه امکان دارد سیستمی دارای هزینهٔ اولیه خرید بالا باشد اما صرفه‌جویی‌های (ناشی از کم بودن خرابی‌ها) بوجود آمده در طول زمان می‌تواند جبران هزینه‌های بالا را بنماید ، لذا کاهش هزینه چرخه عمر به سبب وجود فرصت از دست رفته توصیه نمیشود. اگر هزینه چرخه عمر جهت مقایسه سیستم‌های متمایز با الگوهای خرابی متفاوت مورد استفاده قرار گیرد، ممکن است سبب گمراهی شود. بکارگیری سیاست متغیر در سیستم‌های مکانیکی با چرخه عمر خدماتی طولانی بسیار مفیدتر از بکارگیری آن در سیستم‌های الکترونیکی است. در تمام شبیه‌سازی‌هایی که جهت مقایسه سیاست‌های ثابت و متغیر بکار می روند، فرصت از دست رفته که در محاسبات هزینه چرخه عمر میآید، همان فرصت از دست رفته ناشی از خرابی‌ها می‌باشد.

آزمونهای اعتبار

الف) آزمون وضعیت بی نهایت (حداکثر- حداقل) ـ تعداد صفرخرابی

یکی از روشهای تست مدل ، قرار دادن برخی از پارامترهای آن در حالت حداقل و یا حداکثر (بی نهایت) و تست خروجی مدل می باشد . در اینجا تعداد صفر خرابی را بعنوان وضعیت بی نهایت در نظر می گیریم (حد پائین) ، حد بالای وضعیت بی نهایت را نمیتوان محاسبه نمود (از آنجایی‌که حد بالا میتواند سیستم ویژه‌ای باشد و در خصوص موارد ذهنی مد نظر قرار بگیرد) ، بنابراین فقط حد پایین آن مدنظر قرار میگیرد. شبیه‌سازی انجام گرفته برای تعداد صفر خرابی ارائه کنندهٔ خرابی‌های تجمعی صفر و تعداد فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه تجمعی برابر با تعداد فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه در سال میباشد که توسط کاربر برنامه‌ریزی شده است. از آنجایی‌که سیاست نگهداری پیشگیرانه ای که در دورهٔ بعدی مورد استفاده قرار میگیرد برپایه عملکرد گذشته تعیین میشود و عملکرد گذشته هیچ خرابی ای نداشته است، مدل باید یک سیاست نگهداری پیشگیرانه با صفر خرابی را برای شروع سال دوم ، مستقل از سیاست سال اول، پیشنهاد کند . مدل از آزمون وضعیت بینهایت پیروی مینماید و نتایج در نگاره شماره (۷) نشان داده شده است:

نگاره۷. نتایج آزمون برای حالت حداکثر ـ خرابی صفر

فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه تجمعی	خرابی‌های تجمعی	فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه برنامه‌ریزی شده	میانگین خرابی در سال ۱
۰	۰	۰	۰
۱۰	۰	۱۰	۰
۲۰	۰	۲۰	۰
۳۰	۰	۳۰	۰
۴۰	۰	۴۰	۰
۵۰	۰	۵۰	۰
۶۰	۰	۶۰	۰
۷۰	۰	۷۰	۰
۸۰	۰	۸۰	۰
۹۰	۰	۹۰	۰
۱۰۰	۰	۱۰۰	۰

ب) آزمون خرابی‌های غیرتصادفی (میانگین خرابی سالیانه قابل تعیین)

این آزمون برای مطالعه رفتار مدل ، هنگامی مورد استفاده قرار میگیرد که میانگین خرابی از قبل تعیین شده باشد (عدم تصادفی بودن) . این آزمون به ما کمک میکند که دریابیم آیا منطق مدل آن طور که نیاز است عمل مینماید یا خیر. هنگامی که تاثیر عامل زمان بر خرابی‌ها صفر است ، به عبارت دیگر تأثیر عمر بر خرابی‌ها در نظر گرفته نمیشود ، و خرابی غیرتصادفی نیز نادیده گرفته میشوند ، شمار خرابی‌ها هر ساله میتواند کاهش یافته و فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه میتواند برای سطوحی مشخص نسبت به میزان ضریب اهمیت، تعدیل و کاهش یابد. برای ضریب اهمیت در سطوحی مشخص، سطح پیشگیری بالاتر و سطح خرابی‌ها پایین تر خواهد بود.

همانطوری که در نگاره ۸ و نمودار ۶ مشاهده می‌شود، نرخ خرابی اولیه بالا بوده (۱۰۰) و با افزایش نگهداری پیشگیرانه کاهش می‌یابد. همانطور که از نتایج مشاهده میشود، هر دو متغیر در حدود عدد ۵۰ به تعادل رسیده‌اند. اساس این مدل تعادل بین هزینه فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه و فرصت از دست رفته ناشی از خرابی‌ها می‌باشد. آزمون فوق نشان می‌دهد که این توازن توسط مدل برآورده می شود .

مقادیر پارامترهای بکار رفته شده در این مدل به قرار ذیل است :

۰ = نگهداری پیشگیرانه سال ۱

۱۰۰ = میانگین خرابی در سال ۱

سال ۱۴ = طول عمر

۰/۰۵ = ضریب اهمیت

برای یک سیستم با درصد بالایی از ضریب اهمیت ، فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه هر ساله میتواند بالا بوده در حالیکه تعداد خرابی‌ها عموماً پایین‌تر خواهد بود.

نگاره ۸. آزمون خرابی‌های غیرتصادفی

دوره	خرابی‌ها	فعالیت نگهداری پیشگیرانه
۱	۱۰۰	۰
۲	۱۰۰	۱۰۲
۳	۶۲	۱۰۲
۴	۴۸	۸۹
۵	۳۷	۷۹
۶	۵۰	۷۰
۷	۵۳	۶۷
۸	۵۳	۶۵
۹	۵۳	۶۴
۱۰	۴۳	۶۳
۱۱	۵۳	۶۱
۱۲	۵۳	۶۰
۱۳	۵۳	۶۰
۱۴	۵۳	۵۹

نمودار ۶. فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه و خرابی‌ها با عامل زمان برای تعیین نرخ میانگین خرابی

نتیجه‌گیری

هدف اصلی از این تحقیق معرفی و تعیین سیاست نگهداری متغیر بوده است. ایده کلی برای پیش‌بینی خرابی‌ها استفاده از تکنیک پیش‌بینی میانگین ساده است و تنظیم سیاست

نگهداری پیشگیرانه برطبق آن برای دورهٔ بعدی صورت می گیرد. این مدل همچنین میتواند نیاز به تعیین پارامترهای اصلی سیستم نگهداری پیشگیرانه را قبل از طراحی برآورده نماید، بدین صورت که قبل از طراحی سیستم، بودجه هزینه چرخه عمر و حداکثر خرابی مورد قبول را تعیین نماید. همچنین مدیر نگهداری باید هدفهای روشنی داشته باشد، اهداف ممکن است حداقل نمودن هزینه چرخه عمر یا حداقل نمودن خرابی‌ها ی تجمعی و یا ترکیبی از این دو با محدودیتهای تعیین شده با توجه به حداکثر مقدار مجاز انحراف باشد. نتایج به طور صریح از سیاست نگهداری متغیر در مورد اینکه از سیاست نگهداری ثابت بهتر است و دارای هزینه چرخه عمر پایین‌تر و خرابی‌ها ی تجمعی پایین‌تر میباشد، حمایت نمی‌نماید. نتایج شبیه‌سازی نشان میدهد که هر یک از دو سیاست نمیتوانند به تنهائی برای طرحهای مختلف نتایج سازگار و مناسبی بدست آورند. هنگامی که عامل عمر بالا باشد (۰/۵) و همراه آن عامل یادگیری نیز ۰/۷۵ باشد، شبیه‌سازی نشان میدهد که سیاست متغیر نتایج بهتری را برحسب خرابی‌ها ی تجمعی پایین‌تر (٪۷۰ـ۵۰) با یک افزایش (حدود ٪۱) در هزینه چرخه عمر ارائه مینماید. نتایج همچنین نشان میدهد که سیاست ثابت هنگامی بهتر است که هدف حداقل نمودن خرابی‌ها ی تجمعی برای سیستم‌های با عامل عمر بالا باشد (عامل زمان که بر خرابی‌ها اثر میگذارد). برخی از نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت به شرح زیر آمده است:

الف) حساسیت عامل زمان (عمر) که بر خرابی‌ها اثر میگذارد را میتوان در مرحله طراحی مورد استفاده قرار داد. این امر نیازمند تخمین مدیر با توجه به اثر عامل ایمنی بر عامل زمان که بر خرابی‌ها تأثیر میگذارد، است.

ب) تحلیل حساسیت عامل نگهداری پیشگیرانه بر کاهش خرابی‌ها و عامل یادگیری میتواند برای تعیین سطح مهارت مورد نیاز کارکنان نگهداری مورد استفاده قرار گیرد.

ج) حساسیت زیان هر خرابی را میتوان برای تعیین اثر خطاهای ایجاد شده ناشی از احتساب کمتر از میزان واقعی زیان هر خرابی بکار برد. این مسئله نقش مهمی در خلال تجزیه و تحلیل سیستم دارد.

د) پارامترهای دیگر نتایج خاصی را به دست نمیدهند. نتایج نشان میدهد که بجای ارتقاء آنی و فزاینده درجه تکنولوژی بهتر است دارای یک بهبود مستمر در فرآیند و تکنولوژی باشیم.

منابع

۱. فقیه، نظام‌الدین، (۱۳۸۳)، *سیستم‌های پویا*، تهران، انتشارات سمت.

2. Bengtsson, M. (2004)." Condition Based Maintenance In Technical Systems", Annals of Operational Research, vol 25, No.7, pp:45-53.

3. Burns, J.R (1995)." Component Strategy for The formulation of System Dynamics Models" Computers in Industry, vol.56, pp:364-372.

4. Construction Management Research Unit, (2001)." A generic Approach to Minimizing WLC in The construction Industry".

5. Coyle, R. G. and gardiner, P.A, (June 1996)." A System Dynamic Model of Submarine Operation And Maintenance Schedules", Journal of Operational Research Society, vol. 42, No. 6, pp. 453-463.

6. Drew, D. R. (1989). "Applied systems engineering, International cinference on engineering management", 2nd, IEEE, Toronto, Ontario, Canada, pp: 298-302.

7. Gallistel, C.R. (2002). “The Learning Curve: Implications of a quantitative analysis”,Ph.DThesis, Columbia University.

8. Hamgren, M.(2000)." Maintenance Related Losses", Reaserch Report No.12, Lulea University of Technology.

9. Harvey, J.T(2004). "A System Dynamics Model",Working paper Texas Christian University, Department of Economics,

10. Henrik Thum, J. (2004). "Modeling Modern Maintenance a System Dynamics Model Analyzing the Dynamic Implication of Implementing Total Productive Maintenance", Working paper, Mannheim University,

11. Honkaen, T. (2004)." Modeling Industrial Maintenance System and The effects of Automatic Condition monitoring", Working paper,Helsinki University of Technology.

12. Jamesk. D, and. Ford, D. N. (1998). "Mental Models Concepts for System Dynamics" ,Research Report No. 6, January 7.

13. Kivijarvi, H. and sorismaa, M. (Summer 1995)."Terminal conditions in

system dynamics", System Dynamics Review, vol. 11, No. 2, pp. 95-112.

14. Lind Gvist B.H and , Stove, B. (2004). "Modeling of Dependence Between Critical failure and Preventive Maintenance",Journal of quality in Maintenance, Vol.2, pp:45-59

15. Madachy, R.J(2004). "System Dynamics Modeling of an Inspection Based Process", Novel Research, vol47,pp:145-152

16. Matsumoto,H. (2000). "System Dynamic Model for Life Cycle Assessmental of Residential Buildings", Management science,vol.47, pp:123-132.

17. NASA Technical Standard, Planing, (1998). "Developing and Managing an Effective Reliability and Maintainability Program",Report, December,

18. Ogunlana, S (1996). "A dynamic model for civil engineering design management, Information Representation and Delivery in Civil and Structural" Engineering Design , pp: 47-56

19. Reilly, M.(2001)." Design of Computerized Maintenance Management System for Radionuclide Monitoring", Prentic Hall.

20. Rodrigues, A. and Bowers J., (Summer 1996). "System Dynamic in Project Management: A Comparative Analysis with Traditional Methods", System Dynamic Review, vol. 12, No. 2, pp.121-139

21. Sterman, J., (2000)." Business Dynamics System Thinking and Modeling For a Complex World", McGraw – Hill.

22. The Maintenance Excellence Institute, (2002). “Maximizing Maintenance operations for profit optimization". Report No. 23

23. Yiginglin, L. (2004)."A Simulation Model for field Service with Condition Based Maintenance", United Technologies Research Center.