یک سیاست بهینهٔ تصمیم‌گیری در نگهداری و تعمیرات پیشگیری با در نظر گرفتن عوامل فنی - اقتصادی و سهولت اجرا

علی حاج‌شیرمحمدی*

دانشکدهٔ مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۷۷/۹/۳ - دریافت نسخهٔ‌نهایی: ۷۹/۷/۱۹)

چکیده - *مطالعهٔ حاضر یک نوع سیاست تعمیرات پیشگیری متناسب را برای کاربردهای صنعتی با در نظر گرفتن دو هدف متفاوت تدوین می‌کند. هدف اول، بهینه کردن جمع هزینه‌های نگهداری وتعمیرات، یا به عبارت دیگر، جمع هزینه‌های تعمیرات پیشگیری و تعمیرات اضطراری در واحد زمان است. هدف دوم آن است که سیاست به نحوی طراحی و تدوین شود که کاربرد آن در یک محیط صنعتی و تولیدی به سادگی امکانپذیر باشد.*

در این مطالعات یک مدل شبیه‌سازی، متکی بر روش "مونت کارلو" ساخته شده است. این مدل به تعداد کافی دفعات اجرا شده است تا از نتایج حاصله بتوان به مقدار بهینهٔ یک پارامتر تصمیم‌گیری که TX نامیده شده است دست یافت. مقدار TX این امکان را برای برنامه‌ریزان نگهداری وتعمیرات فراهم می‌سازد تا بر اساس ملاحظات اقتصادی، اجرای بعضی از عملیات پیشگیری را در شرایط مشخصی تا یک دورهٔ بعد به تعویق بیندازند. مثالهای عددی برای نشان دادن ارزش مدل ارائه شده‌اند و ضمن مقایسهٔ سیاست پیشنهاد شده با سیاستهای رایج در صنعت و در ادبیات فنی و صنعتی، ارزش مدل از نظر اقتصادی و سادگی آن از نظر اجرا بررسی شده است.

A Preventive Maintenance Decision Policy Based on Economic-Technical and Applicibility Considerations

A. H. Shirmohammadi

Department of Industrial Engineering and Center for Systems Planning, Isfahan University of Technology

ABSTRACT- ***The present study is intended to develope a Preventive Maintenance (PM) policy for industrial applications, while considering two different objectives: the first objective is to optimize the total maintenance costs, i.e., the Preventive Maintenance (PM) and Emergency Maintenance (EM) Costs Per Unit Time. (CPUT). The second objective is to design the policy in such a way that the simplicity of its application***

---

*- مربی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

in a production industry environment is improved.

A simulation model is constructed and, using a Monte Carlo simulation, the model is run for a sufficient number of cycles in order to determine the optimum value of a decision parameter (TX). The TX value provides the PM planning section with the possibililty of economically postponing the PM action to its next scheduled date. Numerical examples are given to show the validity of the model and comparisons are made with exisiting PM policies in industry and in the literature to evaluate the cost reduction values that can be obtained through the adoption of the policy, while the implementation simplicity is also maintained.

فهرست علائم

ADF	تابع توزیع احتمالی عمر سیستم (شکل ۵)	S	انحراف معیار در مقادیر CPUT برای تعداد دفعات شبیه‌سازی	$t_{\theta/2,n-1}$	عدد جدول t به ازای مقادیر α و n
COSTF	جمع هزینه‌های تعمیرات اضطراری در افق زمانی شبیه‌سازی (شکل ۵، واحد پول)	INC	فواصل زمانی افزایش متغیر تصمیم‌گیری TX (شکل ۵، واحد زمان)	TF	عمر تصادفی به دست آمده براساس ADF، در اجرای مدل شبیه‌سازی (شکل ۵، واحد زمان)
COSTP	جمع هزینه‌های تعمیرات پیشگیری در افق زمانی شبیه‌سازی (شکل ۵، واحد پول)	N	تعداد دوره‌های شبیه‌سازی تعیین شده توسط کاربر (شکل ۵، تعداد)	TIME	طول زمانی افق شبیه‌سازی شده (معادلهٔ ۳، واحد زمان)
CPUT	جمع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در واحد زمان (معادلهٔ ۱، واحد زمان / واحد پول)	n	تعداد دفعات (مراتب) تکرار شبیه‌سازی و هر دفعه به تعداد I دور	t_m	تاریخ اعمال تعمیرات اضطراری
CYC	تعداد سیکلها (دوره‌های) افق زمانی شبیه‌سازی (شکل ۵، تعداد)	NOF	تعداد دفعات تعمیرات اضطراری در طول افق شبیه‌سازی (معادلهٔ ۳، تعداد)	t_p	تاریخ برنامه‌ریزی شده برای اعمال تعمیرات پیشگیری
EM	تعمیرات احتمالی اضطراری براساس ADF (شکل ۱، بدون بعد)	NOP	تعداد دفعات تعمیرات پیشگیری در طول افق زمانی شبیه‌سازی (معادلهٔ ۳، تعداد)	TPMIN	حداقل دامنهٔ PMI (شکل ۵، واحد زمان)
EMC	هزینه هر بار تعمیرات اضطراری (معادلهٔ ۱، واحد پول)	OT	زمان کارکرد از تاریخ آخرین تعمیر سیستم تا تاریخ موردنظر (واحد زمان)	TPMAX	حداکثر دامنهٔ PMI (شکل ۵، واحد زمان)
E(PMI)	تعداد خرابیهای احتمالی مورد انتظار در فاصلهٔ زمانی PMI (معادلهٔ ۱، تعداد)	PM	تعمیرات پیشگیری برنامه‌ریزی شده (شکل ۱، بدون بعد)	TX	پارامتر تصمیم‌گیری در سیاست نوع سوم (شکل ۵، واحد زمان)
F(t)	معادلهٔ تابع توزیع احتمالی عمر سیستم (معادلهٔ ۲، بدون بعد)	PMC	هزینه هر بار تعمیرات پیشگیری (معادلهٔ ۱، واحد پول)	TX′	فاصله زمانی بین t_m تا t_p (واحد زمان)
I	تعداد دوره‌های شبیه‌سازی در ضمن اجرای برنامه (شکل ۵، تعداد)	PMI	فاصلهٔ ثابت زمانی برنامه‌ریزی شده بین دو تعمیر پیشگیری (معادلهٔ ۱، واحد زمان)	Y	میانگین مقادیر CPUT در هر ردیف جداول پاسخها (معادلهٔ ۴)
				α	درصد عدم اطمینان (درصد اطمینان = α-1) در تحلیل آماری
				θ	مقدار مورد انتظار CPUT در تحلیل آماری (معادله ۴)

۱- مقدمه

سیاستهای تعمیرات پیشگیری[1] در صنایع جهانی و در ادبیات مربوطه، عمدتاً متمرکز بر دو شیوهٔ اصلی است. در یکی از این دو شیوه که آن را در اینجا سیاست نوع اول می‌نامیم، ماشین‌آلات و تجهیزات صنعتی در فواصل زمانی مشخص و از پیش تعیین شده تحت عملیات تعمیرات پیشگیری قرار می‌گیرند. در این نوع سیاست، با توجه به تابع احتمالی توزیع عمر تجهیزات (ADF)[2]، و همچنین فاصلهٔ زمانی تعیین شده برای انجام تعمیرات پیشگیری (PMI)، ممکن است در بینابین تاریخهای تعمیرات پیشگیری، هر تعداد احتمالی از خرابیهای پیش‌بینی نشده نیز برای تجهیزات اتفاق افتاده و عملیات تعمیرات اضطراری[3] روی آنها انجام گیرد. در این سیاست، علی‌رغم اینکه ممکن است در فاصلهٔ زمانی کوتاهی قبل از

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

انجام تعمیرات پیشگیری عملیات تعمیرات اضطراری بر روی ماشین انجام گرفته باشد، معهذا در تاریخ معین که از پیش تعیین شده است، فعالیتهای تعمیرات پیشگیری نیز بر روی ماشین اعمال می‌شود [۱]. شکل (۱) مدل مربوط به سیاستهای نوع اول را نشان می‌دهد.

در این شکل، برای مثال، فاصلهٔ زمانی ثابت تعمیرات پیشگیری برابر با ۵ واحد زمانی انتخاب شده است. با مراجعه به تاریخهای ۹ و ۱۰ در این شکل، دیده می‌شود که با اینکه در تاریخ ۹، ماشین به علت خرابی اضطراری تحت تعمیر قرار گرفته است، و این عمل در یک فاصلهٔ زمانی کوتاه قبل از تاریخ برنامه‌ریزی شده برای تعمیرات پیشگیری بوده است، ولی مجدداً در تاریخ ۱۰ طبق برنامهٔ تعیین شده، عملیات تعمیرات پیشگیری بر روی ماشین اجرا شده‌اند.

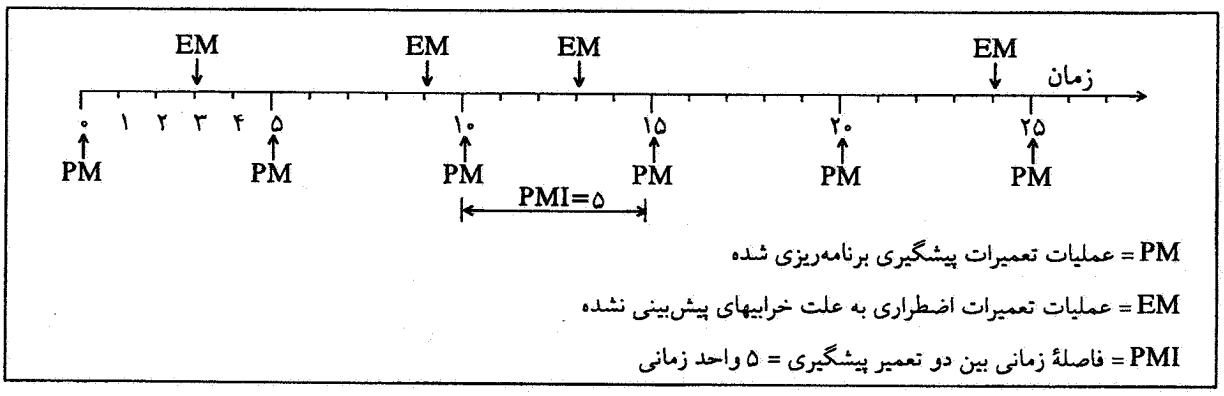
در نوع دیگر سیاستهای معمول برای انجام تعمیرات پیشگیری، که در اینجا سیاستهای نوع دوم نامیده می‌شود، یک فاصلهٔ زمانی مشخص برای اعمال تعمیرات پیشگیری را در نظر می‌گیرند. در این نوع سیاست ضمن اینکه ماشین‌آلات و تجهیزات صنعتی به عملیات تولیدی مشغول‌اند، زمان کارکرد[۴] (OT) آنها یادداشت می‌شود. (زمان کارکرد یا OT در اینجا فاصلهٔ زمانی بین آخرین تاریخ تعمیر ماشین تا تاریخ موردنظر تعریف می‌شود). در این شرایط دو رویداد و حالت احتمالی قابل پیش‌بینی است. اولین حالت احتمالی آن است که ماشین از آخرین تاریخ تعمیر، به مدت مشخص PMI بدون اشکال کارکند (به عبارت دیگر طول زمانی OT برای ماشین به مقدار PMI که برای آن در نظر گرفته شده است برسد). در چنین حالتی ماشین مربوطه طبق برنامه تحت تعمیرات پیشگیری قرار خواهد گرفت. حالت احتمالی دوم آن است که قبل از آنکه زمان کارکرد دستگاه به PMI برسد، دستگاه دچار نوعی خرابی اضطراری بشود. در این حالت طبیعی است که دستگاه تحت عملیات تعمیرات اضطراری قرار خواهد گرفت. پس از راه‌اندازی مجدد، زمان کارکرد دستگاه مساوی با صفر منظور شده و سیاست به همین ترتیب ادامه می‌یابد [۱-۳].

در شکل (۲) مدل مرتبط با سیاست "نوع دوم" نشان داده شده است. در اینجا نیز طول زمانی PMI برابر با ۵ واحد زمان منظور شده است. در تاریخ ۴ تعمیرات پیشگیری روی ماشین اجرا شده است. بین تاریخهای ۴ تا ۹ هیچ گونه خرابی پیش‌بینی نشده روی ماشین اتفاق نیفتاده است، و بنابراین در تاریخ ۹ زمان کارکرد ماشین به عدد PMI رسیده و تعمیرات پیشگیری روی آن اعمال شده است. در شکل (۲) دیده می‌شود که بین تاریخهای ۹ تا ۱۷ هیچ گونه عملیات تعمیر پیشگیری روی ماشین اجرا نشده است، و این امر طبق سیاست تعریف شدهٔ نوع دوم است. در تاریخ ۱۲ یک خرابی اضطراری برای ماشین اتفاق افتاده است، و در نتیجه با انجام تعمیرات اضطراری و راه‌اندازی مجدد ماشین، عدد OT برابر با صفر منظور شده است. پس از آن، با توجه به اینکه از تاریخ ۱۲ تا تاریخ ۱۷ هیچ گونه خرابی اضطراری برای ماشین پیش نیامده است، بنابراین در تاریخ ۱۷، عدد OT به مقدار PMI که برابر با ۵ واحد زمانی تعیین شده رسیده و در نتیجه، در تاریخ ۱۷ تعمیرات پیشگیری روی ماشین انجام گرفته است.

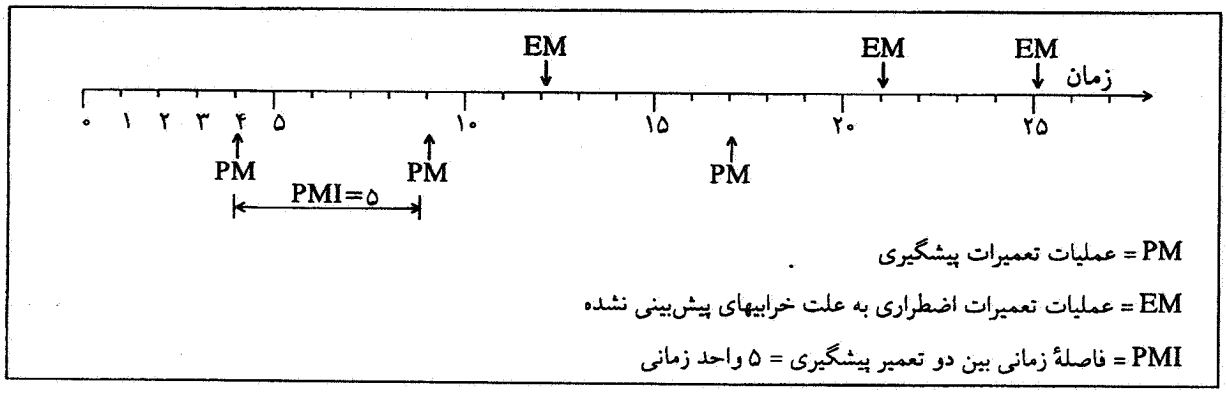
مطالعات پژوهشی بر روی سیاستهای نوع اول و دوم عمدتاً با هدف تعیین عدد بهینه و اقتصادی PMI که براساس آن جمع هزینه‌های تعمیرات در واحد زمان به حداقل برسد انجام گرفته است. در مقالهٔ حاضر متدولوژی تحلیلی پیشنهاد شده توسط جاردین[۵] [۱] در قسمت ۴ مورد بحث قرار گرفته و نتایج حاصله از کاربرد روش تحلیلی جاردین نیز به عنوان یک بررسی جانبی با نتایج به دست آمده از مدل شبیه‌سازی و سیاست نوع سوم که حاصل کار تحقیقاتی ارائه شده در این مقاله است مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

شایان توجه است که سیاستهای نوع اول و نوع دوم هر یک دارای نکات قوت و نکات ضعف خاص خود هستند. ویژگی مثبت سیاست نوع اول این است که در این سیاست، تاریخهای اجرای فعالیتهای تعمیرات پیشگیری از قبل قابل تعیین و قابل برنامه‌ریزی هستند. این ویژگی باعث خواهد شد که امر برنامه‌ریزی عملیات پیشگیری به سهولت توسط بخش نگهداری و تعمیرات انجام گرفته و امور مربوط به برنامه‌ریزی تولید نیز با توجه به ثابت بودن تاریخهای توقف ماشینها برای تعمیرات پیشگیری، به سادگی و با دقت کافی انجام پذیرد. در بیان نکات ضعف این سیاست، باید به این نکته اشاره کرد که در بعضی از مراحل احتمالی، تعمیرات پیشگیری بر روی تجهیزات در فواصلی کوتاه و غیراقتصادی بعد از آنکه روی آن دستگاه عملیات تعمیرات اضطراری انجام گرفته است،

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]



شکل ۱- مدل سیاست نوع اول



شکل ۲- مدل سیاست نوع دوم

صورت می‌پذیرد. برای مثال، چنین حالتهایی در تاریخهای ۹ و ۱۰ و همچنین در تاریخهای ۲۴ و ۲۵ در شکل (۱) مشهودند.

سیاست نوع دوم در مقایسه با سیاست نوع اول از این مزیت برخوردار است که تعمیرات پیشگیری را تنها در تاریخهایی روی تجهیزات اعمال می‌کند که طول زمانی کارکرد تجهیزات به عدد PMI رسیده باشد. در نتیجه، در این سیاست، از این گونه اقدامات غیراقتصادی که در شرایطی نظیر تاریخهای ۱۰ و ۲۵ در شکل (۱) به عمل آمده است جلوگیری می‌شود. در مقابل این مزیت، نقطه ضعف این سیاست آن است که تاریخهای اعمال تعمیرات پیشگیری در این شیوه کاملاً احتمالی بوده و قابل پیش‌بینی نخواهند بود. ویژگی احتمالی بودن تاریخهای انجام تعمیرات پیشگیری در سیاست نوع دوم، مطمئناً کار برنامه‌ریزی و اجرای عملیات پیشگیری توسط امور برنامه‌ریزی و امور اجرایی بخش نگهداری و تعمیرات را پیچیده کرده و برنامه‌های تولید را نیز دچار نوسان و اخلال خواهد کرد.

مطالعات انجام گرفته توسط نویسنده که در این مقاله ارائه می‌شود، سیاست جدیدی را تحت عنوان سیاست نوع سوم ارائه می‌کند. در این سیاست، سعی بر آن است که ضمن برخورداری از مزایای معین بودن تاریخهای تعمیرات پیشگیری که در سیاست نوع اول منظور شده است، حالتهایی غیرمنطقی و غیراقتصادی موجود در سیاست نوع اول حذف شده و با درنظرگرفتن یک عامل متغیر تصمیم‌گیری عملیات تعمیرات پیشگیری به نحوی برنامه‌ریزی شوند که مجموع هزینه‌های تعمیراتی در واحد زمان به سطحی بهینه واقتصادی کاهش یابد.

سیاست نوع سوم در قسمت ۳ در این مقاله تشریح شده است. به منظور دستیابی به سطح بهینهٔ متغیر تصمیم‌گیری[۶] در سیاست نوع سوم، یک مدل شبیه‌سازی[۷] "مونت کارلو"[۸] تدوین شده و با استفاده از آن اعداد بهینهٔ فاصلهٔ زمانی اعمال تعمیرات پیشگیری و متغیر تصمیم‌گیری تعیین شده‌اند. هزینه‌های قابل پیش‌بینی براساس این سیاست نیز از طریق اجرای مدل

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

شبیه‌سازی تعیین شده و برای نشان دادن ارزش این سیاست، این هزینه‌ها با هزینه‌های مورد انتظار که از طریق اعمال سیاست نوع اول بر سیستم تحمیل می‌شوند مقایسه شده‌اند و میزان کاهش هزینه براورد شده است.

۲- سوابق تحقیقاتی

علی‌رغم نارساییهای موجود در سیاست نوع دوم که در قسمت قبل مورد بحث واقع شد، بسیاری از فعالیتهای مطالعاتی و پژوهشی در سالهای اخیر بر مبنای این سیاست انجام گرفته است [۲-۸]. تداوم مطالعات پژوهشی در این سیاستها به بررسی وضع تجهیزاتی که در اثر فرسودگی، بعد از هر بار تعمیرات پیشگیری، نوع جدیدی از تابع توزیع عمر (ADF) را خواهند داشت پرداخته است [۲-۶]. در انجام این مطالعات از تکنیکهای شبیه‌سازی، نظیر شبیه‌سازی "مونت کارلو" به وفور استفاده شده است [۷ و ۸]. اهداف این مطالعات عمدتاً برای کاهش هزینه‌های تعمیرات در واحد زمان، یا کاهش سرعت احتمالی خرابیهای اضطراری بوده و در این راستا نتایج رضایتبخشی حاصل شده است [۹-۱۱]. در مواردی در انجام این مطالعات از سیستم‌های خبره[9] و هوش مصنوعی[10] استفاده شده و از این طریق به سیاستهایی که اقتصاد کلی امور نگهداری و تعمیرات (نت) را در صنعت بهبود داده و یا تعداد خرابیهای غیرمنتظره را کاهش داده‌اند دستیابی حاصل شده است [۱۲-۱۳].

مدلهای مرتبط با سیاستهای نوع اول در مراجعی نظیر [۱] مطرح شده‌اند و فواصل زمانی بهینهٔ PM برای آنها تعیین شده است. همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد، تعداد معدودی از این مطالعات به عامل سهولت برنامه‌ریزی و اجرای فعالیتهای تعمیرات پیشگیری معطوف بوده است، و در نتیجه این مطالعات عمدتاً بر مبنای اصول مطرح شده در سیاست نوع دوم انجام گرفته‌اند. اوزبورن[11] [۱۴] در مطالعات خود به عامل سهولت برنامه‌ریزی و اجرای عملیات پیشگیری توسط کارکنان سطح کارگاه توجه کرده و به همین نحو شوتن[12] و وارنست[13] [۱۵] نیز این موضوع را مورد ملاحظه قرار داده‌اند.

ادامه مطالعات سیاستهای PM که در تکامل سیاستهای قبلی انجام گرفته است در موارد زیاد به شرایط ویژه اعمال تعمیرات اضطراری پرداخته است. برای مثال چن[14] و فلدمن[15] [۱۷] شرایط "حداقل تعمیرات اضطراری" را در بین فواصل PM در سیاست نوع اول مطرح می‌کنند، به نحوی که این تعمیرات تنها برای راه‌اندازی مجدد سیستم و ادامهٔ کار آن تا نوبت بعدی PM کافی باشد. همچنین مدلهای توأم، شامل ترکیبی از سیستمهای کنترل تولید و موجودی و نگهداری و تعمیرات مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۷ و ۱۸]. مطالعات اخیر هر دو نوع سیاست نوع اول و دوم را با عناوین مختلفی نظیر "تعمیرات متکی بر زمان"[16] برای نوع اول و "تعمیرات متکی بر کارکرد یا عمر سیستم"[17] برای نوع دوم، شامل می‌شوند.

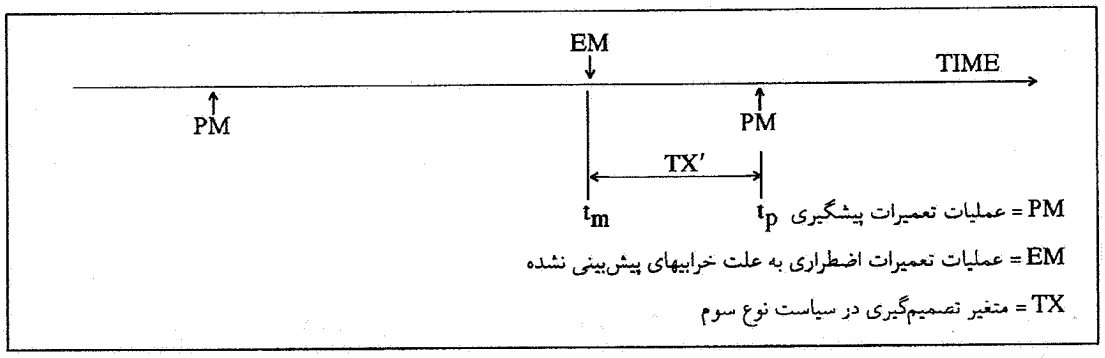
با اینکه شرایط ویژه و مدلهای ترکیبی مورد مطالعه می‌توانند در موارد مشخص کاربرد داشته باشند ولی به نظر می‌رسد در این مدل ε مسئلهٔ بنیادی ساختار نوع جدیدی از سیاستهای بهینه به حد کافی مورد توجه قرار نگرفته است.

۳- مدل تحقیقاتی

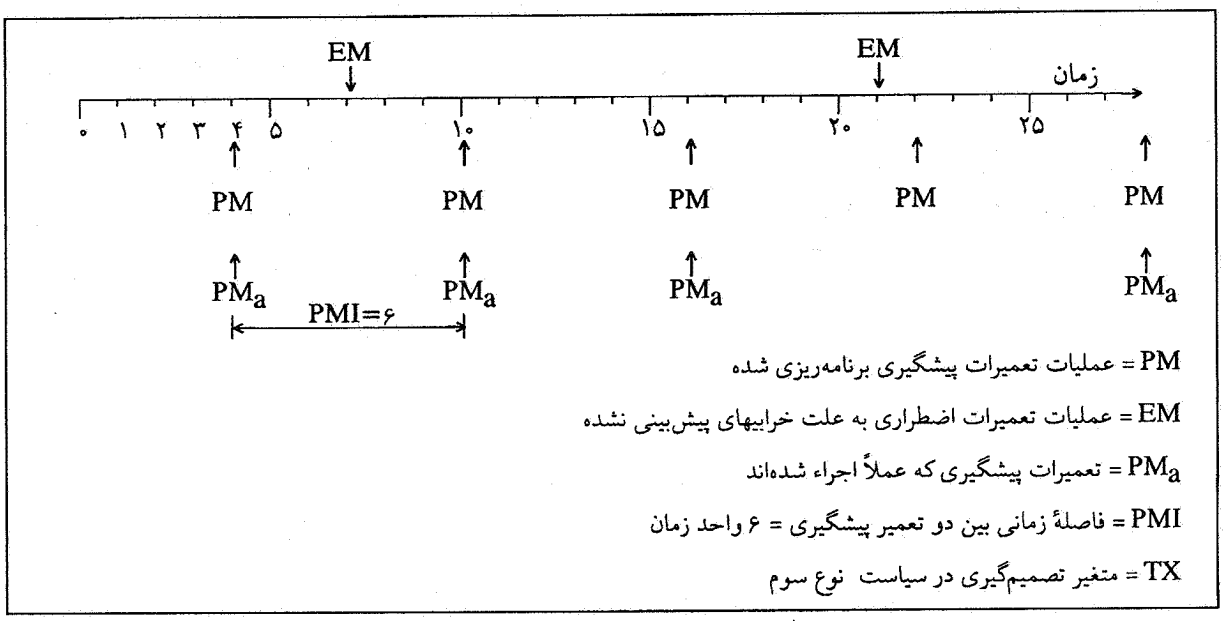
سیاست نوع سوم که به عنوان نتایج مطالعات حاضر در این مقاله معرفی می‌شود از یک عامل متغیر تصمیم‌گیری که در این مقاله TX نامیده شده است استفاده می‌کند. این سیاست، ضمن رعایت اصول سیاست نوع اول که در آن تاریخهای اعمال تعمیرات پیشگیری معین و از پیش تعیین شده‌اند، براین مبنا متکی است که هرگاه در بین فواصل تعمیرات پیشگیری، به دلیل رخداد خرابی، تعمیرات اضطراری بر روی دستگاه صورت پذیرفت، "فاصلهٔ زمانی کارکرد" بین تاریخ این تعمیرات اضطراری، تا تاریخ بعدی تعیین شده برای تعمیرات پیشگیری با عدد TX مقایسه می‌شود. در صورتی که تاریخ آخرین تعمیرات اضطراری روی دستگاه را t_m و تاریخ بعدی اعمال تعمیرات پیشگیری را t_p بنامیم، آن گاه "فاصلهٔ زمانی کارکرد" که آن را 'TX می‌نامیم برابر t_p-t_m خواهد بود. در این سیاست، تصمیم‌گیری مناسبی براساس گزارهٔ زیر به عمل می‌آید:

اگر $TX<(t_p-t_m)$ *باشد، تعمیرات پیشگیری طبق برنامه انجام خواهد گرفت، در غیر این صورت، تعمیرات پیشگیری مربوط به تاریخ* t_p *حذف شده و این تعمیرات برای دورهٔ بعد برنامه‌ریزی خواهد شد.*

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]



شکل ۳- مدل نشان‌دهندهٔ متغیر تصمیم‌گیری TX′ در سیاست نوع سوم



شکل ۴- مدل سیاست پیشنهادی نوع سوم

در شکل (۳) پارامتر TX′ نشان داده شده است. شکل (۴) مدل مرتبط با سیاست نوع سوم را نشان می‌دهد. در این شکل مقدار مربوط به فاصلهٔ زمانی بین دو تعمیر پیشگیری (PMI)و مقدار مربوط به متغیر تصمیم‌گیری (TX) به ترتیب برابر با ۶ و ۲ انتخاب شده‌اند. بنابراین در صورتی که شروع برنامه از تاریخ ۴ باشد، آن گاه تاریخهای برنامه‌ریزی شده ابتدایی برای انجام تعمیرات پیشگیری عبارت از ۴، ۱۰، ۱۶،... خواهند بود. در تاریخ ۴، ماشین موردنظر، طبق برنامه تحت عملیات تعمیرات پیشگیری قرار گرفته است. در تاریخ ۷، به علت پیش آمدن یک خرابی پیش‌بینی نشده تعمیرات اضطراری روی ماشین صورت پذیرفته است. ولی با توجه به اینکه فاصلهٔ زمانی بین این عمل تعمیراتی تا تاریخ برنامه‌ریزی شده بعدی برای تعمیرات پیشگیری بزرگتر از عدد TX است، (۲<۷-۱۰)، بنابراین برنامه تعمیرات پیشگیری بعدی در جای خود باقی خواهد ماند. حال، در صورتی که شرایط تاریخهای ۲۱ و ۲۲ مورد ملاحظه قرارگیرند، با توجه به اینکه در تاریخ ۲۱ عملیات تعمیرات اضطراری بر روی دستگاه انجام شده و فاصلهٔ زمانی بین این تاریخ تا تاریخ برنامه‌ریزی شده بعدی برای انجام تعمیرات پیشگیری، یعنی فاصله زمانی بین تاریخهای ۲۱ تا ۲۲ کوچکتر از متغیر تصمیم‌گیری (TX) است، بنابراین تعمیرات پیشگیری تاریخ ۲۲ از برنامه حذف شده و این برنامه به تاریخ ۲۸ موکول می‌شود.

با کاربرد این سیاست، مدل تدوین شده در جستجوی مقادیر مناسب و اقتصادی PMI و TX که به ازای آنها جمع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در واحد زمان (CPUT) به حداقل برسد، خواهد بود. مقادیر مرتبط با جمع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

که بدین ترتیب به دست می‌آیند، نسبت به مقادیر قابل حصول از طریق سیاست نوع اول کاهش قابل توجهی داشته و در عین حال ، برنامهٔ حاصل ازویژگی ثابت بودن تاریخهای انجام تعمیرات پیشگیری برروی محور زمان برخوردار است.

۴- روش حل تحلیلی

یک روش تحلیلی برای دستیابی به فاصلهٔ زمانی ثابت و بهینه بین دو تعمیر پیشگیری (PMI)، با هدف حداقل کردن جمع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در واحد زمان توسط جاردین [۱] برای سیاست نوع اول ارائه شده است. مدل شبیه‌سازی تدوین شده برای سیاست پیشنهادی در این مقاله، در یک حالت خاص (TX=0)، با سیاست نوع اول تطبیق داشته، و در نتیجه قابل پیش‌بینی است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شرایط ویژه TX=0 به نتایج حاصل از حل تحلیلی مسئله نزدیک باشند. برای بررسی این امر، یک برنامهٔ ویژهٔ رایانه‌ای به منظور حل تحلیلی مسئله براساس معادله‌های (۱) و (۲) تهیه شده و با دادن ترکیبهای متعددی از داده‌ها، نتایج حاصل از حل مسئله به روش تحلیلی با نتایج قابل حصول از شبیه‌سازی در حالت خاص TX=۰ مقایسه شدند. این نتایج با تقریب کاملاً قابل قبول به یکدیگر نزدیک بودند.

$$CPUT = \frac{PMC+EMC\ .\ E(PMI)}{PMI} \qquad (۱)$$

مقدار E(PMI) یا تعداد خرابیهای اضطراری مورد انتظار در فاصلهٔ زمانی PMI از طریق معادلهٔ برگشتی (۲) محاسبه می‌شود:

$$E(PMI) = \sum_{i=0}^{PMI-1} [1 + E(PMI-i-1) \int_{i}^{i+1} f(t).dt \qquad (۲)$$

حل بهینهٔ معادله (۱) مربوط به آن مقدار از PMI خواهد بود که به ازای آن جمع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سیستم در واحد زمان (CPUT) به حداقل ممکن برسد.

۵- مدل شبیه‌سازی

در شکل (۵)، نمودار جریان برنامه شبیه‌سازی به صورت خلاصه نشان داده شده است. مدل شبیه‌سازی با هدف دستیابی به مقادیر مختلف CPUT (هزینه در واحد زمان) به ازای سطوح مختلف PMI و TX اجرا می‌شود. همان گونه که در قسمت قبل بیان شد، در این مدل در صورتی که حالت ویژه TX=0 در نظر گرفته شود، نتایج حاصل با سیاست "نوع اول" همسانی خواهد داشت. برای اجرای مدل، یک برنامهٔ ویژهٔ رایانه‌ای تهیه شده است. این برنامه، اطلاعات ورودی نظیر عوامل هزینه‌ای PMC و EMC و نوع تابع توزیع احتمالی عمر سیستم (ADF) و متغیرهای مرتبط با ADF، همچنین داده‌هایی نظیر فواصل افزایشی TX و حدود دامنهٔ PMI را از کاربر دریافت داشته و به تعداد دورهای تعیین شده توسط کاربر به اجرای برنامه می‌پردازد. در اجرای برنامه، با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی "مونت کارلو"، ضمن ایجاد اعداد تصادفی و با توجه به تابع توزیع احتمالی عمر سیستم، طول زمان احتمالی کارکرد (عمر احتمالی TF) برای سیستم تعیین می‌شود. آن گاه با توجه به گزارهٔ تصمیم‌گیری ارائه شده در قسمت (۳)، (تحت عنوان مدل تحقیقاتی سیاست "نوع سوم")، حالتهای قابل انتظار برای یک افق زمانی دراز مدت (بنابه درخواست کاربر)، شبیه‌سازی شده و با شمارش NOF و NOP یعنی تعداد تعمیرات اضطراری و تعمیرات پیشگیری و محاسبهٔ کل زمان افق برنامه‌ریزی شده (TIME)، مقدار CPUT را از معادلهٔ (۳) محاسبه می‌کند.

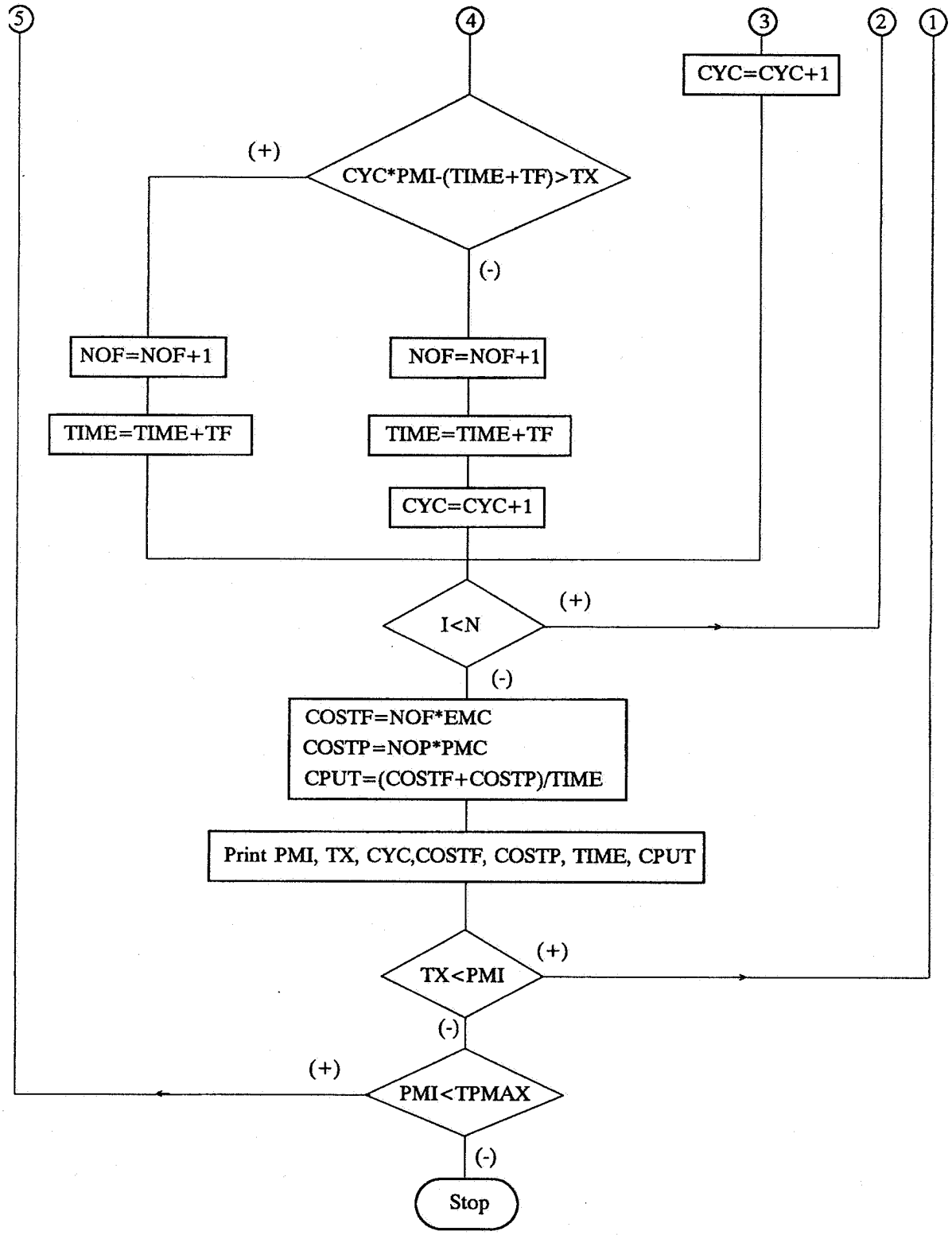
$$CPUT = \frac{(NOF.EMC)+(NOP.PMC)}{TIME} \qquad (۳)$$

نهایتاً مقادیر CPUT به ازای سطوح مختلف PMI و TX برای تجزیه و تحلیل کاربر و تعیین سطوح بهینه این متغیرها در سیاست پیشنهادی نوع سوم مطابق آنچه که در قسمت بعدی توضیح داده می‌شود چاپ می‌شوند.

۶- مثالهای عددی

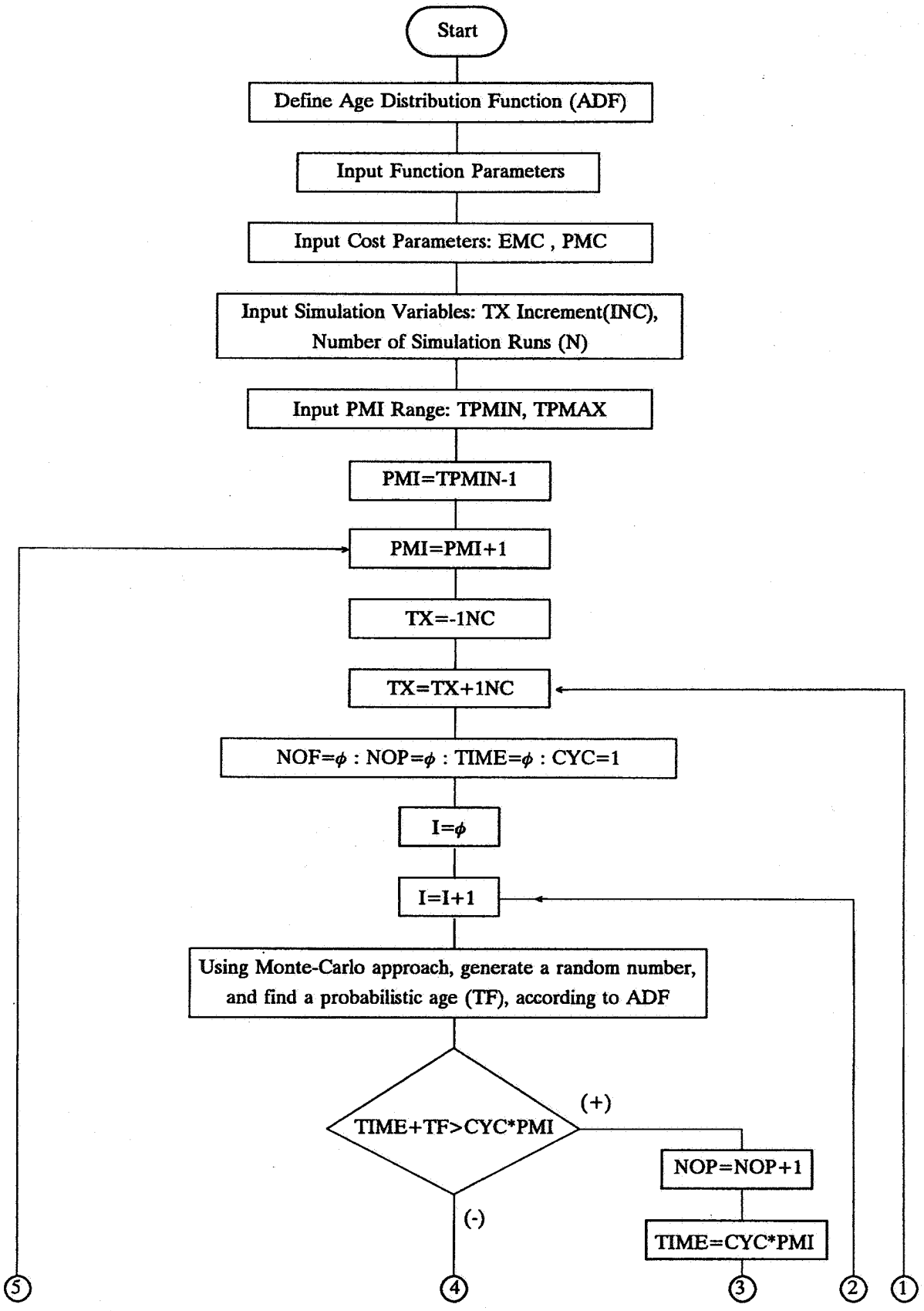
در مثالهای عددی که در جداول (۱)، (۲) و (۴) ارائه شده‌اند، خروجیهای مدل شبیه‌سازی به ترتیب برای توابع توزیع نرمال، یکنواخت و نمایی نشان داده شده است. در این جداول متغیرهای مربوط به توابع توزیع، پارامترهای هزینه و سایر اطلاعات ورودی در قسمت بالای جدول مشخص شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، شامل هزینه در واحد زمان (تابع هدف) و بخشی از

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]



شکل ۵- نمودار جریان مدل شبیه سازی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]



شکل ۵- ادامه نمودار جریان مدل شبیه سازی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

جدول ۱- نتایج شبیه‌سازی - تابع احتمالی توزیع عمر = نرمال

میانگین = ۵		انحراف معیار = ۱/۵		نوع تابع: نرمال		
PMC=7		EMC=10				
شمارهٔ ردیف	PMI	TX	COSTF	COSTP	TIME	CPUT
۱	۳	۰	۸۴۹۰	۶۴۰۵۷	۲۷۴۵۳	۲/۶۴۲
۲	۳	۱	۸۹۳۰	۶۳۷۴۹	۲۹۳۲۲	۲/۴۷۸
۳	۳	۲	۹۸۳۰	۶۳۱۱۹	۲۹۸۴۴	۲/۴۴۴
۴	۳	۳	۱۰۶۱۰	۶۲۵۷۳	۲۹۹۷۶	۲/۴۴۱
۵	۴	۰	۲۰۴۴۰	۵۵۶۹۲	۳۱۴۴۶	۲/۴۲۱
۶	۴	۱	۲۴۷۷۰	۵۲۶۶۱	۳۶۳۸۰	۲/۱۲۸
۷	۴	۲	۲۹۱۴۰	۴۹۶۰۲	۳۸۴۲۳	۲/۰۴۹
۸	۴	۳	۳۳۰۸۰	۴۶۸۴۴	۳۹۴۰۴	۲/۰۲۸
۹	۴	۴	۳۴۴۴۰	۴۵۸۹۲	۳۹۷۳۲	۲/۰۲۱
۱۰	۵	۰	۳۳۷۷۰	۴۶۳۶۱	۳۳۱۱۵	۲/۴۱۹
۱۱	۵	۱	۴۲۱۰۰	۴۰۵۳۰	۲۸۷۵۸	۲/۱۳۱
۱۲	۵	۲	۵۲۸۶۰	۳۲۹۹۸	۴۲۸۰۷	۲/۰۰۵
۱۳	۵	۳	۶۳۰۴۰	۲۵۸۷۲	۴۵۰۵۹	۱/۹۷۳
۱۴	۵	۴	۷۰۰۱۰	۲۰۹۹۳	۴۶۵۰۴	۱/۹۵۶
۱۵	۵	۵	۷۴۴۰۰	۱۷۹۲۰	۴۶۴۶۲	۱/۹۸۷
۱۶	۶	۰	۴۳۶۴۰	۳۹۴۵۲	۳۳۸۲۰	۲/۴۵۶
۱۷	۶	۱	۵۲۰۱۰	۳۳۵۹۳	۳۸۸۵۶	۲/۲۰۳
۱۸	۶	۲	۶۳۱۶۰	۲۵۷۸۸	۴۳۴۳۰	۲/۰۴۸
۱۹	۶	۳	۷۴۰۸۰	۱۸۱۴۴	۴۶۳۲۳	۱/۹۹۰
۲۰	۶	۴	۸۲۴۸۰	۱۲۲۶۴	۴۸۰۷۲	۱/۹۷۰
۲۱	۶	۵	۸۹۶۶۰	۷۲۳۸	۴۹۱۶۵	۱/۹۷۰
۲۲	۶	۶	۹۴۷۵۰	۳۶۷۵	۴۹۶۸۷	۱/۹۸۰
۲۳	۷	۰	۴۹۷۰۰	۳۵۲۱۰	۳۴۲۲۴	۲/۴۸۱
۲۴	۷	۱	۵۶۰۸۰	۳۰۷۴۴	۳۸۸۶۷	۲/۲۳۳
۲۵	۷	۲	۶۴۸۶۰	۲۴۵۹۸	۴۳۲۰۳	۲/۰۷۰
۲۶	۷	۳	۷۵۳۵۰	۱۷۲۵۵	۴۶۱۶۴	۲/۰۰۵
۲۷	۷	۴	۸۵۱۴۰	۱۰۴۰۲	۴۸۳۰۴	۱/۹۷۷
۲۸	۷	۵	۹۲۴۲۰	۵۳۰۶	۴۹۲۱۷	۱/۹۸۵
۲۹	۷	۶	۹۶۷۷۰	۲۲۶۱	۴۹۷۶۹	۱/۹۸۹
۳۰	۷	۷	۹۸۹۶۰	۷۲۸	۴۹۷۳۳	۲/۰۰۴

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

سایر اطلاعات قابل محاسبه از طریق مدل به ازای سطوح مختلف PMI و TX در جداول نشان داده شده است. در این جداول مقادیر CPUT در ردیفهای مربوط به TX=0 نشان‌دهندهٔ نتایجی هستند که از سیاستهای نوع اول قابل انتظار است. با مراجعه به جدول (۱)، مقدار حداقل CPUT در بین ردیفهای مربوط به TX=0، (ردیف ۱۰، PMI=5، TX=0، CPUT=2.419)، عبارت از بهترین نتیجه‌ای است که انتظار می‌رود با استفاده از سیاست نوع اول قابل حصول باشد. ولی همان گونه که در جدول مشاهده می‌شود با کاربرد سیاست نوع سوم، یعنی انتخاب پارامتر تصمیم‌گیری TX=4، مطابق آنچه که در ردیف ۱۴ آمده است، عدد CPUT قابل کاهش به سطح ۱/۹۵۶ خواهد بود. بنابراین، کاربرد سیاست پیشنهادی، یک صرفه‌جویی حدود ۱۹ درصد را در برخواهد داشت.

در جدول (۲) نیز که از یک تابع توزیع احتمالی یکنواخت استفاده شده است، نتیجه قابل انتظار از کاربرد سیاست نوع اول، در ردیف ۱۰، برابر با ۲/۰۱۷ است و با کاربرد سیاست نوع سوم، عدد CPUT از ۲/۰۱۷ به ۱/۸۰۷ کاهش یافته است.

ضمن مراجعه به جداول (۱) و (۲)، می‌توان به نتایج و نظریه‌های جالب توجهی دست یافت: برای مثال کاهش مداوم مقادیر CPUT در ردیفهای مربوط به PMI=3 در جدول (۱) نشان‌دهندهٔ این واقعیت است، که در نظر گرفتن یک فاصلهٔ زمانی ثابت تعمیرات پیشگیری، برابر با ۳ واحد زمان، برای دستگاه مورد مطالعه مناسب و اقتصادی نخواهد بود. همچنین این نتیجه قابل حصول است که علاوه بر ردیفهای مربوط به مقدار بهینهٔ PMI، در سایر ردیفها (مثلاً در ردیفهای مربوط به PMI=7 در جدول ۱) نیز ممکن است به یک عدد نسبی حداقل هزینه دستیابی حاصل کرد. (به ردیف ۲۷ در جدول (۱) که مقدار CPUT را برابر با ۱/۹۷۷ نشان می‌دهد مراجعه شود). این امر نشانگر این واقعیت است که حتی درکارخانجات و صنایعی که یک نوع تحلیل فنی - اقتصادی برای دستیابی به فاصلهٔ زمانی بهینهٔ انجام تعمیرات پیشگیری به عمل نیامده است و از یک فاصله زمانی غیراقتصادی استفاده می‌شود نیز تغییر از سیاستهای معمول نوع اول به سیاست نوع سوم که ضمن مطالعات حاضر معرفی می‌شود، می‌تواند یک تصمیم‌گیری اقتصادی و مقرون به صرفه باشد.

در بعضی از ردیفهای جداول ارائه شده (برای مثال در ردیفهای ۴ و ۹ در جدول ۱)، مقادیر حداقل CPUT در شرایطی اتفاق افتاده‌اند که اعداد PMI با TX برابرند. در صورتی که مقدار حداقل CPUT برای یک سطح مشخص PMI، در شرایط تساوی PMI و TX اتفاق بیفتد، این مفهوم قابل برداشت است که با این مقادیر PMI، هر گاه یک خرابی اضطراری روی دستگاه اتفاق افتاده و در نتیجه تعمیرات اضطراری روی آن دستگاه انجام گیرد، لازم خواهد شد که عملیات پیشگیری برنامه‌ریزی شده بعدی از برنامه حذف شده و این عملیات به مدت یک دوره کامل به تعویق بیفتد.

۷- بحثی پیرامون بهینگی سیاست ارائه شده

۷-۱- مقایسهٔ نتایج با سیاست نوع اول

قابل توجه است که در استفاده از سیاست نوع سوم که ضمن این مطالعات تدوین و در مقالهٔ حاضر ارائه شده است، در هیچ موردی نتایج حاصله نمی‌توانند از نتایج قابل حصول از سیاستهای نوع اول ضعیفتر باشند. دلیل امر آن است که در مدل شبیه‌سازی طراحی شده برای این سیاست، متغیر تصمیم‌گیری (TX) در بازه‌ای بین صفر (۰) تا PMI تغییر کرده و به ازای هر یک از مقادیر TX عدد CPUT (تابع هدف) محاسبه شده و نشان داده می‌شود. بدیهی است مقدار بهینهٔ TX مربوط به وضعیتی است که به ازای آن CPUT حداقل بشود. در صورتی که در شرایط بسیار استثنایی مقدار حداقل CPUT در TX=0 اتفاق بیفتد، سیاست نوع سوم نتیجه‌ای هم ارز با سیاست نوع اول دارد. در سایر شرایط، به ازای هر مقدار TX در بازهٔ $0<TX\leq PMI$ که CPUT حداقل بشود، سیاست نوع سوم نتیجه‌ای بهتر از نوع اول را ارائه کرده است.

شرایط استثنایی که به ازای آنها مقدار بهینهٔ TX می‌تواند به صفر نزدیک باشد مربوط به مواقعی است که :

- هزینه‌های تعمیرات پیشگیری (PMC) در مقایسه با تعمیرات اضطراری (EMC) بسیار کم باشند.
- تابع توزیع عمر سیستم (ADF) دارای انحراف معیار کم باشد).

هر یک از شرایط بالا مناسبت اعمال تعمیرات پیشگیری را تشدید کرده، و به عبارت دیگر با هدایت TX بهینه به سمت صفر (۰) فرصت کمتری را برای حذف تعمیرات پیشگیری باقی می‌گذارد [۸]. جدول (۳) نتایج شبیه‌سازی را برای نسبت کوچک PMC/EMC نشان می‌دهد. همان گونه که انتظار می‌رود، مقادیر

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

جدول ۲- نتایج شبیه سازی - تابع احتمالی توزیع عمر = یکنواخت

میانگین = ۵ انحراف معیار = ۱/۵ نوع تابع: نرمال

PMC=5 EMC=10

شمارهٔ ردیف	PMI	TX	COSTF	COSTP	TIME	CPUT
۱	۳	۰	۱۴۴۰۰	۴۲۸۰۰	۲۵۶۸۲	۲/۲۲۷
۲	۳	۱	۱۷۵۱۰	۴۱۲۴۵	۲۹۶۳۴	۱/۹۸۲
۳	۳	۲	۱۸۷۴۰	۴۰۶۳۰	۲۹۹۷۶	۱/۹۸۰
۴	۳	۳	۱۸۴۷۰	۴۰۷۶۵	۲۹۹۹۱	۱/۹۷۵
۵	۴	۰	۲۵۵۳۰	۳۷۲۳۵	۲۹۷۸۸	۲/۱۰۷
۶	۴	۱	۲۹۷۳۰	۳۵۱۳۵	۳۳۸۲۴	۱/۹۱۷
۷	۴	۲	۳۷۳۰۰	۳۱۳۵۰	۳۷۸۶۷	۱/۸۱۲
۸	۴	۳	۴۱۲۶۰	۲۹۳۷۰	۳۹۰۲۲	۱/۸۱۰
۹	۴	۴	۴۲۷۲۰	۲۸۶۴۰	۳۹۵۸۴	۱/۸۰۲
۱۰	۵	۰	۳۳۷۱۰	۳۳۱۴۵	۳۳۱۴۵	۲/۰۱۷
۱۱	۵	۱	۳۹۸۰۰	۳۰۱۰۰	۳۷۲۱۷	۱/۸۷۸
۱۲	۵	۲	۴۸۴۴۰	۲۵۷۸۰	۴۰۶۶۵	۱/۸۲۵
۱۳	۵	۳	۵۹۹۳۰	۲۰۰۳۵	۴۴۲۴۰	۱/۸۰۷
۱۴	۵	۴	۶۶۲۹۰	۱۶۸۵۵	۴۵۴۸۶	۱/۸۲۷
۱۵	۵	۵	۷۱۲۸۰	۱۴۳۶۰	۴۶۶۴۵	۱/۸۳۳
۱۶	۶	۰	۴۱۶۶۰	۲۹۱۷۰	۳۵۰۰۸	۲/۰۲۳
۱۷	۶	۱	۴۸۷۱۰	۲۵۶۴۵	۳۹۱۲۵	۱/۹۰۰
۱۸	۶	۲	۵۸۲۴۰	۲۰۸۸۰	۴۲۸۷۰	۱/۸۴۵
۱۹	۶	۳	۶۹۵۱۰	۱۵۲۴۵	۴۵۵۲۹	۱/۸۶۱
۲۰	۶	۴	۷۸۷۹۰	۱۰۶۰۵	۴۷۹۷۰	۱/۸۶۳
۲۱	۶	۵	۸۷۱۷۰	۶۴۱۵	۴۸۶۴۹	۱/۹۲۳
۲۲	۶	۶	۹۲۰۲۰	۳۹۹۰	۴۹۲۹۸	۱/۹۴۷
۲۳	۷	۰	۴۹۰۰۰	۲۵۵۰۰	۳۵۷۰۴	۲/۰۸۶
۲۴	۷	۱	۵۶۵۴۰	۲۱۷۳۰	۴۰۰۱۲	۱/۹۵۶
۲۵	۷	۲	۶۶۳۲۰	۱۶۸۴۰	۴۳۲۳۲	۱/۹۲۳
۲۶	۷	۳	۷۵۷۴۰	۱۲۱۳۰	۴۶۴۰۱	۱/۸۹۳
۲۷	۷	۴	۸۳۷۴۰	۸۱۳۰	۴۷۹۴۵	۱/۹۱۶
۲۸	۷	۵	۹۱۱۶۰	۴۴۲۰	۴۹۱۷۰	۱/۹۴۳
۲۹	۷	۶	۹۵۳۰۰	۲۳۵۰	۴۹۷۸۹	۱/۹۶۱
۳۰	۷	۷	۹۸۷۳۰	۶۳۵	۴۹۸۰۳	۱/۹۹۵

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

جدول ۳- نتایج شبیه سازی - تابع احتمالی توزیع عمودی (نسبت کوچک هزینهٔ PMC به EMC)

میانگین = ۵	انحراف معیار = ۱/۵	نوع تابع: نرمال				
PMC=0.1	EMC=10					
شمارهٔ ردیف	PMI	TX	COSTF	COSTP	TIME	CPUT
۱	۳	۰	۸۲۱۰	۹۱۷/۹	۲۷۵۳۷	۰/۳۲۱
۲	۳	۱	۹۶۲۰	۹۰۳/۸	۲۹۲۵۹	۰/۳۵۹
۳	۳	۲	۹۸۸۰	۹۰۱/۲	۲۹۹۱۰	۰/۳۶۰
۴	۳	۳	۹۹۶۰	۹۰۰/۴	۲۹۹۹۷	۰/۳۶۲
۵	۴	۰	۲۰۴۱۰	۷۹۵/۹	۳۱۸۳۶	۰/۶۶۶
۶	۴	۱	۲۴۰۰۰	۷۶۰	۳۶۴۳۶	۰/۶۷۹
۷	۴	۲	۳۰۲۸۰	۶۹۷/۲	۳۸۴۵۶	۰/۸۰۵
۸	۴	۳	۳۲۴۳۰	۶۷۵/۷	۳۹۴۹۶	۰/۸۳۸
۹	۴	۴	۳۴۴۵۰	۶۵۵/۵	۳۹۷۵۶	۰/۸۸۳
۱۰	۵	۰	۳۴۰۰۰	۶۶۰	۳۳۰۰۰	۱/۰۵۰
۱۱	۵	۱	۴۲۶۲۰	۵۷۳/۸	۳۸۶۴۵	۱/۱۱۷
۱۲	۵	۲	۵۲۵۲۰	۴۷۴/۸	۴۳۰۳۷	۱/۲۳۱
۱۳	۵	۳	۶۲۵۱۰	۳۷۴/۹	۴۵۲۶۹	۱/۳۸۹
۱۴	۵	۴	۷۰۴۶۰	۲۹۵/۴	۴۶۶۲۱	۱/۵۱۷
۱۵	۵	۵	۷۵۶۸۰	۲۴۳/۲	۴۷۴۱۴	۱/۶۰۱
۱۶	۶	۰	۴۳۳۹۰	۵۶۴/۱	۳۳۸۴۹	۱/۳۰۴
۱۷	۶	۱	۵۲۰۷۰	۴۷۹/۳	۳۸۶۵۷	۱/۳۵۹
۱۸	۶	۲	۶۳۸۰۰	۳۶۲	۴۳۴۸۰	۱/۴۷۵
۱۹	۶	۳	۷۳۹۳۰	۲۶۰/۷	۴۶۶۴۴	۱/۵۹۰
۲۰	۶	۴	۸۳۱۹۰	۱۶۸/۱	۴۸۴۲۰	۱/۷۲۱
۲۱	۶	۵	۹۰۳۸۰	۹۶/۲	۴۹۰۹۳	۱/۸۴۲
۲۲	۶	۶	۹۴۹۹۰	۵۰/۱	۴۹۸۷۶	۱/۹۰۵
۲۳	۷	۰	۴۹۸۶۰	۵۰۱/۴	۳۵۰۹۸	۱/۴۳۴
۲۴	۷	۱	۵۵۷۴۰	۴۴۲/۶	۳۸۸۴۶	۱/۴۴۶
۲۵	۷	۲	۶۵۳۹۰	۳۴۶/۱	۴۲۸۳۵	۱/۵۳۴
۲۶	۷	۳	۷۵۰۳۰	۲۴۹/۷	۴۶۶۴۵	۱/۶۱۳
۲۷	۷	۴	۸۴۹۷۰	۱۵۰/۳	۴۸۲۴۸	۱/۷۶۴
۲۸	۷	۵	۹۲۲۲۰	۷۷/۸	۴۹۴۵۶	۱/۸۶۶
۲۹	۷	۶	۹۷۰۱۰	۲۹/۹	۴۹۹۵۳	۱/۹۴۲
۳۰	۷	۷	۹۹۲۰۰	۸	۴۹۸۶۸	۱/۹۸۹

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

جدول ۴- نتایج شبیه سازی - تابع احتمالی توزیع عمر = نمایی

		EMC-10 PMC=5	سرعت خرابی = ۰/۰۵		نوع تابع: نمایی	
شمارهٔ ردیف	PMI	TX	COSTF	COSTP	TIME	CPUT
۱	۳	۰	۱۳۰۱۰	۴۳۴۹۵	۲۶۰۹۷	۲/۱۶۵
۲	۳	۱	۱۳۴۹۰	۴۳۲۵۵	۲۷۲۸۹	۲/۰۷۹
۳	۳	۲	۱۴۵۱۰	۴۲۷۴۵	۲۸۳۵۹	۲/۰۱۸
۴	۳	۳	۱۵۵۸۰	۴۲۲۱۰	۲۹۶۴۹	۱/۹۴۹
۵	۴	۰	۱۷۵۷۰	۴۱۲۱۵	۳۲۹۷۵	۱/۷۸۲
۶	۴	۱	۱۷۰۳۰	۴۱۴۸۵	۳۴۸۲۸	۱/۶۸۰
۷	۴	۲	۱۷۷۵۰	۴۱۱۲۵	۳۶۲۷۶	۱/۶۲۲
۸	۴	۳	۱۸۸۸۰	۴۰۵۶۰	۳۷۷۲۶	۱/۵۷۵
۹	۴	۴	۱۹۲۰۰	۴۰۴۰۰	۳۹۳۷۶	۱/۵۱۳
۱۰	۵	۰	۱۹۷۹۰	۴۰۱۰۵	۴۰۱۰۶	۱/۴۹۳
۱۱	۵	۱	۲۰۸۰۰	۳۹۶۰۰	۴۱۷۰۰	۱/۴۴۸
۱۲	۵	۲	۲۱۵۱۰	۳۹۲۴۵	۴۳۳۰۵	۱/۴۰۲
۱۳	۵	۳	۲۱۷۹۰	۳۹۱۰۵	۴۵۱۲۰	۱/۳۴۹
۱۴	۵	۴	۲۳۵۱۰	۳۸۲۴۵	۴۶۸۱۵	۱/۳۱۹
۱۵	۵	۵	۲۴۸۷۰	۳۷۵۶۵	۴۸۴۵۰	۱/۲۸۸
۱۶	۶	۰	۲۳۱۴۰	۳۸۴۳۰	۴۶۱۱۹	۱/۳۳۵
۱۷	۶	۱	۲۴۲۲۰	۳۷۸۹۰	۴۷۸۹۲	۱/۲۹۶
۱۸	۶	۲	۲۵۱۵۰	۳۷۴۲۵	۴۹۵۱۸	۱/۲۶۳
۱۹	۶	۳	۲۵۷۴۰	۳۷۱۳۰	۵۱۷۷۲	۱/۲۱۴
۲۰	۶	۴	۲۷۵۱۰	۳۶۲۴۵	۵۳۴۴۲	۱/۱۹۲
۲۱	۶	۵	۲۷۹۳۰	۳۶۰۳۵	۵۵۶۳۸	۱/۱۴۹
۲۲	۶	۶	۲۸۵۵۰	۳۵۷۲۵	۵۷۶۷۸	۱/۱۱۴
۲۳	۷	۰	۲۵۸۳۰	۳۷۰۸۵	۵۱۹۲۳	۱/۲۱۱
۲۴	۷	۱	۲۷۳۱۰	۳۶۳۴۵	۵۳۵۲۸	۱/۱۸۹
۲۵	۷	۲	۲۸۰۳۰	۳۵۹۸۵	۵۵۸۸۸	۱/۱۴۵
۲۶	۷	۳	۲۹۳۷۰	۳۵۳۱۵	۵۷۴۵۶	۱/۱۲۵
۲۷	۷	۴	۲۹۹۲۰	۳۵۰۴۰	۶۰۰۲۵	۱/۰۸۲
۲۸	۷	۵	۳۱۱۰۰	۳۴۴۵۰	۶۲۰۲۷	۱/۰۵۶
۲۹	۷	۶	۳۳۰۸۰	۳۳۴۶۰	۶۴۱۴۱	۱/۰۳۷
۳۰	۷	۷	۳۳۱۰۰	۳۳۴۵۰	۶۶۵۴۴	۱/۰۰۰

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

حداقل CPUT همواره در مقابل اعداد TX=0 اتفاق افتاده‌اند. جدول (۴) مربوط به نتایج شبیه‌سازی یک تابع نمایی است. در این جدول اعداد بهینهٔ TX کاملاً به PMI نزدیک شده و در نتیجه حتی‌المقدور انجام تعمیرات پیشگیری را حذف می‌کنند.

۷-۲- مقایسهٔ نتایج با سیاست نوع دوم

با توجه به عنوان مقاله که با دو هدف "فنی - اقتصادی" و "سهولت اجرا" به ارائهٔ یک سیاست پیشنهادی نوع سوم می‌پردازد، برتری سیاست پیشنهادی در برابر سیاست نوع دوم مبتنی بر مقایسهٔ سطح سهولت اجرای سیاستهاست. در این مورد با توجه به کیفی بودن هزینه‌های مرتبط با مشکلات اجرایی، ارائهٔ یک مقایسهٔ کمّی متصور نیست. در سیاست نوع دوم، تاریخهای اعمال تعمیرات پیشگیری، احتمالی و تصادفی وابسته به آخرین تاریخی هستند که نوعی تعمیرات (پیشگیرانه یا اضطراری) بر روی سیستم انجام شده است، شکل (۲). نامعین بودن تعمیرات پیشگیری باعث خواهد شد که فعالیتهای برنامه‌ریزی، چه در بخش تولید و چه در بخش نگهداری و تعمیرات، با مشکلات اجرایی مواجه شوند. هزینه‌های غیرمستقیم حاصل از این گونه مشکلات و اختلالها می‌توانند به طور اخص در سیستمهای تولید پیوسته و انبوه قابل توجه باشند. با توجه به این گونه هزینه‌های غیرمستقیم، اتکا بر سیاستهایی که برنامه‌ریزی PM را از حالت احتمالی خارج کرده و تاریخها را به صورت قطعی و معین در اختیار بخشهای نگهداری و تعمیرات و تولید می گذارند، از مزیت بیشتری برخوردار بوده و هدف مطالعهٔ حاضرند.

۸- تحلیل آماری جهت دستیابی به سطح دقت شبیه‌سازی

۸-۱- دقت شبیه‌سازی

به منظور دستیابی به سطح دقت شبیه‌سازی، هر یک از ردیفهای جداول پاسخها به تعداد ۱۰ مرتبه، و در هر مرتبه به تعداد ۱۰,۰۰۰ دور (I = 10,000 در نمودار جریان مدل شبیه‌سازی، شکل ۵) شبیه‌سازی انجام گرفته و نتایج حاصل از مراتب ۱ تا ۱۰ گانه حاصل از هر ردیف جدول به دست آمده و سپس با مراجعه به جداول آماری "t"[۱۸] و استفاده از معادلهٔ (۴)، دقت مربوط به سطح اطمینان ۹۵ درصد (α=0/05) محاسبه شدند.

$$\overline{Y} - \frac{S(t_{\alpha/2,n-1})}{\sqrt{n}} \le \Theta \le \overline{Y} + \frac{S(t_{\alpha/2,n-1})}{\sqrt{n}} \qquad (۴)$$

متوسط مقادیر انحراف معیار مربوط به نتایج ۱۰ گانه حاصل از هر ردیف جدول، برای مجموعه ردیفها برابر با ۰/۰۰۶۲ بوده و متوسط دامنهٔ دقت برابر با ۰/۰۰۴۴ ± به دست آمده است. در نتیجه، نسبت دامنه به میانگین مقادیر CPUT کمتر از ۰/۰۰۲ (یا ۰/۲ درصد) است. به عبارت دیگر، نتیجهٔ تحلیل آماری نشان می‌دهد که با اطمینان ۹۵ درصد، میزان خطا در اعداد CPUT کمتر از ۰/۲ درصد خواهد بود. (به علت فزونی حجم محاسبات آماری از ارائهٔ جزییات در نوشتار حاضر خودداری شده، ولی اطلاعات لازم برای ارائه به علاقه‌مندان موجود است).

۸-۲- اطمینان به بهینگی نتایج سیاست پیشنهادی

به منظور تعیین میزان بهینگی و تعیین سطح اطمینان مربوط به میزان بهینگی نتایج سیاستهای نوع سوم در مقایسه با نوع اول، از روش آزمایش آماری تفاضل بین اعداد تصادفی جفت شده استفاده شد [۱۸]. هر یک از جفتهای اعداد، مربوط به مقادیر CPUT در سیاستهای نوع اول و سوم بوده و حاصل یک بار اجرای شبیه‌سازی با یک عدد هستهٔ اولیه است (هر اجرای شبیه‌سازی شامل ۱۰,۰۰۰ دور برداشت اعداد تصادفی در روش مونت - کارلوست). بدیهی است با انجام ۳۳ اجرای شبیه‌سازی، اعداد مربوط به درجهٔ آزادی برابر با ۳۲=۱-۳۳ شده و اطمینان لازم از ایجاد یک توزیع کاملاً نزدیک به نرمال را تأمین خواهد کرد [۱۸]. مدل آماری آزمایشی به شرح زیر تهیه شده:

فرضیه H_0: $\mu_1 - \mu_3 \ge 0.43$

فرضیه گزینهٔ مخالف (H_1): $\mu_1 - \mu_3 < 0.43$

$$X = \frac{\overline{d} - D_0}{S_d/\sqrt{n}} \qquad (۵)$$

قانون بررسی: در صورتیکه $X < -t_{n-1,\alpha}$ باشد، فرضیه H_0 رد می‌شود.

با کاربرد مدل بالا و استفاده از نتایج شبیه‌سازی، مقادیر X و

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

t_{n-1} به ترتیب برابر با ۱/۹۸۶ و ۱/۶۹۴ به دست آمده و در نتیجه فرضیه H_0 با اطمینان ۹۵ درصد قبول می‌شود. در این شرایط CPUT حاصل از سیاست ۳ با اطمینان ۹۵ درصد، به میزان ۱۷ درصد نسبت به سیاست نوع اول اقتصادیتر است . (جزییات نتایج شبیه‌سازی و محاسبات آماری برای ارائه به علاقه‌مندان موجود است).

۹- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مطالعات حاضر به معرفی نوعی سیاست جدید در امور نگهداری و تعمیرات پیشگیری در صنایع پرداخت. این سیاست در حد فاصل بین دو شیوهٔ متداول در ادبیات امروزی که در این مقاله با عناوین سیاستهای نوع اول و نوع دوم از آنها نام برده شد قرار می‌گیرد. روش پیشنهاد شده برای تعمیرات پیشگیری در این مقاله، از یک سو سعی در تثبیت تاریخهای اعمال تعمیرات پیشگیری بر روی دستگاهها و تجهیزات تولیدی داشته و از سوی دیگر با درنظر گرفتن اثرات فنی - اقتصادی، به دنبال یافتن عوامل بهینهٔ زمانی برای برنامه‌ریزی امور تعمیرات پیشگیری است.

ویژگی قابلیت تعیین تاریخهای ثابت انجام تعمیرات پیشگیری در این سیاست، کمک مؤثری را در سهولت امور اجرایی نگهداری و تعمیرات و بخش تولید کرده و از ایجاد اخلال در برنامه‌ریزی تولید جلوگیری به عمل خواهد آورد. این ویژگی سیاست نوع سوم را از بُعد اجرایی در مقایسه با سیاست نوع دوم از مزیت بیشتری برخوردار می‌سازد. بدیهی است که با توجه به خصوصیت تصادفی بودن طول زمانی کارکرد سالم تجهیزات، همواره این امکان وجود دارد که در فواصل زمانی بین دو تعمیر پیشگیری برنامه‌ریزی شده یک یا چند خرابی اضطراری اتفاق افتاده و انجام عملیات تعمیر اضطراری را الزامی سازد. این گونه خرابیهای اضطراری ممکن است در تاریخهایی نزدیک به تاریخهای برنامه‌ریزی شده برای تعمیرات پیشگیری اتفاق بیفتد. سؤالی که باید در این موقعیت به آن پاسخ داد این است که آیا یک ماشین که در یک فاصلهٔ زمانی کوتاه قبل از تاریخ تعمیرات پیشگیری، تحت تعمیر اضطراری قرار گرفته است لازم خواهد داشت که مجدداً در تاریخ تعیین شده تحت تعمیرات پیشگیری قرار گیرد، یا مناسب است که در تاریخ تعمیرات پیشگیری آن یک انعطاف و تغییر منطقی حاصل شود. برای پاسخگویی به این سؤال، یک پارامتر زمانی تصمیم‌گیری به نام TX در سیاست پیشنهادی معرفی شده و یک قانون تصمیم‌گیری متکی بر ملاحظات فنی - اقتصادی برای ارائه یک پاسخ مطلوب تنظیم و ارائه شد. براین اساس، مدل شبیه‌سازی تدوین شده با ترکیبهای متعدد و متفاوت پارامترهای هزینه و توابع توزیع عمر اجرا شد. نتایج حاصل از سه نوع متداول از این ترکیبها، شامل توابع توزیع عمر احتمالی از نوع منحنی نرمال، منحنی یکنواخت، و منحنی نمایی به ترتیب در جداول (۱)، (۲) و ۴ ارائه شده‌اند. در جدول (۳) به منظور نشان دادن صحت عملکرد مدل، به یک فرض منطقی توجه شده است. در این جدول نسبت هزینه‌های تعمیرات پیشگیری به تعمیرات اضطراری بسیار کوچک در نظرگرفته شده است. بدیهی است که در چنین شرایطی انجام تعمیرات پیشگیرانه تشویق می‌شود.

در قسمت (۷) ضمن ارائهٔ توابع توزیع با ویژگیهای موردنظر و همچنین با تغییر نسبت هزینه‌های PM به هزینه‌های تعمیرات اضطراری عملکرد مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است. قابل توجه است که در استفاده از سیاست نوع سوم که ضمن این مطالعات تدوین شده و در این مقاله ارائه شده است در هیچ موردی نتایج حاصله نمی‌توانند از نتایج قابل حصول از سیاستهای نوع اول ضعیفتر باشند. در شرایط خاص و استثنایی این امکان وجود خواهد داشت که نتایج حاصل از کاربرد این سیاست، با نتایج حاصل از کاربرد سیاست نوع اول مساوی بشوند. این حالت تنها در مواردی پیش خواهد آمد که مقدار حداقل عدد CPUT در شرایطی که TX=0 است اتفاق بیفتد. در این شرایط ویژه، سیاستهای نوع اول و نوع سوم با یکدیگر همسان خواهند بود.

علی رغم سطح اطمینان و دقتی که در نتایج شبیه‌سازی در مدل حاضر به دست آمده است (قسمت ۸)، ادامهٔ مطالعات می‌تواند شامل تدوین مدلهای ریاضی برای دستیابی به مقدار بهینهٔ TX باشد. همچنین با توجه به اینکه در مقاله حاضر سیاستهای ۱ و ۳ مورد مقایسهٔ کیفی قرار گرفته‌اند، تدوین مدلهای مناسب برای مقایسهٔ کمی سیاستهای نوع دوم با سیاستهای نوع اول و سوم می‌تواند در فعالیتهای مطالعاتی آینده نگهداری و تعمیرات منظور شود. در این گونه مطالعات مناسب است که هزینه‌های غیرمستقیم اختلال در برنامه‌های تولیدی و تعمیراتی در سیاستهای نوع دوم، به صورت کمی در تابع هزینه منظور شوند.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]

واژه نامه

1. preventive maintenance
2. age distribution function
3. emergency maintenance
4. operating time
5. Jardine
6. decision parameter
7. simulation
8. Monte Carlo
9. expert systems
10. artificial intelligence
11. Osborne
12. Schouten
13. Varneste
14. Chen
15. Feldman
16 time based maintenance
17. age based maintenance
18. t-student statistical tables

مراجع

1. Jardine, A.K.S., *Maintenance, Replacement, and Reliability*, Pitman Publishing, U.K, 1978.
2. Hai-yan, Gu., "Studies on Optimum Preventive Maintenance Policies for General Repair Results," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.41, pp. 197-201, 1993.
3. Stoikova, L.S., "Choosing Optimal Service Frequency for a System With Outage Delay," *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 30, pp. 95-9, 1994.
4. Shey, H.S., and Ching, T.L., "A Generalized Sequential Preventive Maintenance Policy for Repairable Systems With General Random Minimal Repair Cost," *International Journal of Systems Science*, Vol. 26, pp. 681-90, 1995.
5. Ascher, H.E., and Kobbacy, K.A.H.,"Modelling Preventive Maintenance for Deteriorating Repairable Systems," *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry,* Vol. 6 pp. 85-99, 1995.
6. Jansen, J., and Van der Duyn, S.F., "Maintenance Optimization on Parallel Production Units," *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry*, Vol. 6, pp.113-43, 1995.
7. Blanchard, B.S., and Fabricky, W.J., *Systems Engineering and Analysis*, Prentice Hall, U.S.A, 1990.
8. حاج شیرمحمدی، ع.، برنامه‌ریزی نگهداری وتعمیرات - مدیریت فنی در صنایع، انتشارات غزل، فصلهای ۱۹ و ۲۲، ۱۳۷۰.
9. Bottazzi, A., et.al "Improving the Preventive Maintenance of a Bus Yard by a Monte Carlo Simulation Method," *Proceedings of the Safety and Reliability Conference,* U.K., pp. 883-95, 1992.
10. Dekker, R., and Smeitink, E. "Preventive Maintenance at Opportunities of Restricted Duration," *Journal of Naval Research Logistics,* Vol. 41, pp. 335-53, 1994.
11. Mathew, J., and Rajendran, E., "Scheduling of Maintenance Activities in a Sugar Industry Using Simulation," *Computers in Industry*, Vol. 21, pp. 331-4, 1993.
12. Khan, M.K., and Wahab, A.S.A., "Development of a Rule Based Preventive Maintenance Program for a Water Treatment Plant in Malaysia," *Proceedings of the Conference on Strategies for Monitoring, Control, and Management of waste*, U.K., pp. 29-34, 1995.
13. Mahmoud, M.A.W., et.al " Optimum Preventive Maintenance (PM) for the mean TFSF of a Repairable System with Imperfect Switch Over, "*Journal of Advances in Modelling and Analysis*," Vol. 41, pp. 7-25, 1994.
14. Osborne, D., and Taj, S., "Preventive Maintenance in a Multiple Shift and High Volume Manufacturing Operation," *International Journal of Operations and Manufacturing Management* Vol. 13, pp. 76-83, 1993.
15. Schouten, F.A., and Varneste, S.G., "Two Simple Maintenance Policies for a Multicomponent Maintenance System," *Journal of Operations Research*, Vol. 41, pp. 1125-36, 1993.
16. Mingchih chen and Richard M. Feldman "Optimal Replacement Policies with Minimal Repair and Age-Dependent Costs," *European Journal of Operational Research*, Vol. 98, pp. 75-84, 1997.
17. Tapas, K. Das, and Sudeep, S.,"Optimal Preventive Maintenance in a Production Inventory System," *IIE Transactions*, Vol. 31, pp. 357-551, 1999.
18. Newbold P., *Statistics for Business and Economics*, 5th. ed., Prentice Hall International Editions, 1998.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.2.5.5]