نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با در نظر گرفتن قابلیت دسترسی مولفه‌ها در یک سیستم: مطالعه موردی در کوره‌های دوار سیمان

بختیار استادی
کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشکده فنی دانشگاه تهران
BOstadi@engmail.ut.ac.ir
کامران پازند
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشکده فنی دانشگاه تهران
kpazand@gmail.com
مسعود شریعت پناهی
استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی دانشگاه تهران

واژه‌های کلیدی
نگهداری و تعمیرات (نت) پیشگیرانه- قابلیت دسترسی (Availability)- قابلیت اطمینان (Reliability)- کوره دوار سیمان

چکیده
در این مقاله با در نظر گرفتن سه فعالیت سرویس، تعمیر و تعویض برنامه تعمیرات پیشگیرانه در یک سیستم مورد بررسی قرار گرفته است بطوریکه قابلیت دسترسی مولفه‌های سیستم مبنای کار می‌باشد. سرویس شامل عملیات روغن‌کاری، تمیزکاری، بازرسی و تنظیم بوده و تعمیر شامل ترمیم و تصحیح خطای دستگاه می‌باشد. تعویض نیز عبارت از جایگزینی قسمت آسیب دیده است. قابلیت دسترسی به عنوان احتمال عملکرد موفقیت‌آمیز یک سیستم یا دستگاه در هر مقطعی از زمان در مواقعی که تحت شرایط مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعریف می‌شود. جهت ایجاد درک صحیحی از برنامه‌های پیشگیرانه و مراقبت‌های ضروری و بررسی وضعیت فنی در سیستم، باید این برنامه‌ها بر پایه نتایج عدم جلوگیری از ایجاد شکست و خرابی بنا شوند. همچنین این نوع برنامه‌ها در صورتی قابل قبول هستند که هزینه‌های ناشی از ایجاد خرابی به مراتب بیشتر از هزینه‌های مربوط به اجرای برنامه‌های پیشگیرانه باشد. همچنین باید روش‌های دقیق و صحیح جهت بازرسی‌های اساسی و بررسی‌های وضعیت فنی تجهیزات شناسایی و استفاده شوند. بهتر است این نوع برنامه‌ها در وضعیت روشن بودن تجهیزات صورت گیرند و تواتر اجرای این برنامه‌ها بر پایه زمان‌های خرابی و توزیع‌های ایجاد شکست صورت گیرد. در پایان نیز این بررسی‌ها در کوره‌های دوار سیمان پیاده‌سازی شده است که نتایج اجرای آن نشانگر کاهش هزینه بوده بطوریکه قابلیت دسترسی و اطمینان مولفه‌های سیستم تامین شده است.

مقدمه

مهمترین عامل برای نگهداری یک سیستم در حالت نرمال انجام یک برنامه نگهداری و تعمیرات (نت) کامل می‌باشد. تا باعث افزایش عمر سیستم در مدت زمان سرویس‌دهی آن سیستم باشد. در یک برنامه نت دو نوع فعالیت تعمیرات اصلاحی[1] (CM) و تعمیرات پیشگیرانه[2] (PM) مطرح است که بایستی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. در واقع CM تحت عنوان تعمیرات تعریف شده و بمنظور خارج ساختن دستگاه از وضعیت نامناسب صورت می‌گیرد مانند بالانس کردن پروانه فن، تعویض یاتاقان شکسته و یا بر طرف کردن کلیه عیوب موجود در سیستم پس از وقوع آن. از طرفی دیگر PM تحت عنوان نگهداری تعریف شده که بمنظور جلوگیری از خرابی‌های تصادفی در سیستم صورت می‌گیرد که عملیاتی نظیر روغنکاری، تعویض بموقع قطعات و ضخامت‌سنجی لوله‌ها و غیره می‌باشد. لازم بذکر است که PM به دلیل جلوگیری از خرابی سیستم موثرتر از CM می‌باشد [3-1].

هدف از اجرای PM جلوگیری از تعویض قطعات می‌باشد. برای مثال Jayabalan and Chaudhuri [2] الگوریتمی برای تعیین تداخل نت قبل از تعویض بلوک‌ها را ارائه دادند. Dekker and Aven [3] با ارائه یک شبکه کاری شامل تغییرات عمر و تعویض بلوک‌ها، بهینه‌کردن زمان تعویض را مورد بررسی قرار دادند. Zheng [4] مدل جایگزینی سیستم چند مولفه‌ای را ارائه نمود. Legat [5] و همکارانش دوره‌های بهینه PM / تعویض را بیان نمودند. Wang [6] مدل برنامه‌ریزی برای جلوگیری از تعویض تجهیزات کلیدی سیستم مکانیکی را ارئه نمود، بطوری که هدف کاهش ریسک هزینه و خرابی در سیستم بود.

با بازبینی بر روی مقالات بالا مشاهده می‌شود که تمام آنها بر روی مدل‌های ریاضی برای دستیابی به سیاست PM بهینه متمرکز شده‌اند. برای یک سیستم که شامل مولفه‌ها و زیرسیستم‌ها می‌باشد فعالیت نت اساساً وابسته به سطح‌های ارتقاء هزینه نت زیر سیستم‌ها می‌باشد و این فرآیندها بیشتر به یک نت ناقص مشابه است. بمنظور بهبود نت Whitaker and samaniego [7] به روش ارزیابی قابلیت اطمینان روی آوردند. با توجه به فعالیت چندگانه در نت، Martorel [8] و همکارانش فرض نمودند که فعالیت PM بر روی عمر اجزاء بعنوان یک اثر نت تاثیر گذار بوده و مدل عمر وابسته برای تعیین ریسک و مشکلات اقتصادی را پیشنهاد نمودند. قبل از آن نیز مدل قابلیت اطمینان بوسیله Martorel [9] و همکارانش پیشنهاد شد که شامل پارامترهای نظارت شرایط کاری و عملکرد بود. در یک سیستم چند مولفه‌ای جهت اجرای یک نت کامل سه پارامتر سرویس‌کاری، تعویض و تعمیر باید بکار برده شوند.

الف) سرویس‌کاری:

این نوع فعالیت بر روی نگهداری و تعمیرات یک سیستم در حالت عملکرد نرمال آن تکیه دارد. از خصوصیات آن این است که معمولاً تکنیک و ابزار کمی لازم داشته و بهبود آن با محدودیت مواجه است. عملیات مرتبط با آن شامل روانکاری، تنظیم یا کالیبراسیون دستگاه (سیستم)، بستن پیچ‌های شل، پاک کردن غبار و ضخامت سنجی، تامین مواد مصرفی مانند روغن و آب و ... می‌باشد.

ب) تعمیر:

این نوع فعالیت برای بعضی از زیر سیستم‌هایی که گرانقیمت و یا ساده هستند مورد کاربرد است و شامل عملیات قسمت (الف) و تعمیر/تعویض برای قطعات شامل فنرها، درزبندی‌ها، تسمه ها، بیرینگ ها و ... می‌باشد.

ج) تعویض:

شامل جایگزین کردن زیر سیستم‌های اصلی از سیستم موردنظر با نمونه جدید آن می‌باشد و بطور گسترده بعنوان کلید زیر سیستم‌های اصلی نامبرده، مطرح می‌باشد.

در این مقاله، حداکثر قابلیت دسترسی از زمانبندی PM در سیستم را مدنظر قرار می‌دهیم که برای این منظور دوره‌های PM را برای هر زیر سیستم تعیین و و برنامه PM را در هر مرحله از آن بدست می‌آوریم. لازم بذکر است که هدف از استراتژی PM تنها نگهداری سیستم در دوره تعیین شده نمی باشد بلکه همواره کسب حداکثر سود بر اساس قابلیت دسترسی بهینه نیز در اهداف آن مطرح می‌باشد.

۱- قابلیت اطمینان تحت PM

قابلیت اطمینان در مورد یک ماشین، احتمال صحت عملکرد آن تحت شرایط معین و در زمان تعیین‌شده می‌باشد. محاسبات انجام شده در مورد قابلیت اطمینان یک خط تولید می‌تواند به عنوان ابزاری برای کنترل ماشین‌آلات مورد استفاده قرار گیرد. در مورد ماشین‌آلات و

---

[1] - Corrective Maintenance

[2] Preventive Maintenance

تجهیزات برای افزایش قابلیت اطمینان راه‌حل‌هایی را پیشنهاد می‌کنند. همانطورکه بیان شد پارامتر قابلیت اطمینان احتمال موفقیت یک دستگاه یا ماشین را در یک فرجه زمانی مشخص می‌نماید و تابع آن بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$R(t)=1-F(t)$$

که F(t) احتمال خرابی ماشین یا دستگاه مورد نظر را تا زمان t نشان می‌دهد و به آن تابع توزیع خرابی یا شکست می‌گویند. اگر متغیر تصادفی t تابع چگالی F(t) را داشته باشد، بنابراین تابع قابلیت اطمینانی آن را می‌توان بصورت زیر تعریف نمود:

$$R(t)=1-F(t)=1-\int_0^t f(u)du=\int_t^\infty f(u)du$$

برای مثال اگر زمان خرابی یک دستگاه به وسیله تابع چگالی نمایی تعریف شود، آنگاه خواهیم داشت:

$$f(t)=\frac{1}{t}e^{-t/\theta}$$

که در آن θ متوسط عمر دستگاه و t فرجه زمانی مورد نظر می‌باشد و بنابراین قابلیت اطمینانی در زمان t بصورت زیر خواهد بود:

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

۲- فرموله کردن مساله

در این مقاله سیستمی متشکل از ۵ زیر سیستم (۱- یاتاقان, ۲- گیربکس, ۳- الکتروموتور, ۴- بدنه فلزی و ۵- لایه های حرارتی یا آجر نسوز) را جهت ارائه روند برنامه‌ریزی PM در نظر می‌گیریم. با توجه به آنکه مناسب‌ترین توزیع احتمالی برای قابلیت اطمینان توزیع وایبول[3] است، لذا قابلیت اطمینان زیر سیستم‌ها را از این توزیع بدست می‌آوریم. در ادامه قابلیت اطمینان سیستم را نیز بوسیله روش ارائه شده توسط راو[4] بصورت زیر تعریف می‌کنیم [10]:

$$R_S(t)=R_C(t)\sum_{i=1}^{5}\{1-\alpha_i[1-R_i(t)]\}$$

که در آن α_i احتمال خرابی سیستم بر اثر خرابی iامین زیر سیستم است. جهت برنامه‌ریزی برنامه PM بر مبنای قابلیت دسترسی لازم است که پارامترهای مربوط به نت تعیین شوند که این پارامترها دربرگیرنده زمان‌های مورد نیاز در نت می‌باشند.

افزایش قابلیت اطمینان سیستم غالباً می‌تواند ناشی از یک برنامه PM باشد. بمنظور طرحریزی برنامه PM بوسیله قابلیت دسترسی، نخست باید اصطلاحات ریاضی آن بیان شود. معمولاً قابلیت دسترسی وابسته به هر دو پارامتر قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری می‌باشد. اگر MUT حاکی از میانگین بالا بودن دستگاه یا ماشین و نیز MDT حاکی از میانگین پایین بودن دستگاه یا ماشین باشد که شامل کلیه موارد نت می‌شود، در آنصورت داریم [10]:

$$A=\frac{MUT}{MUT+MDT}$$

چنانچه برنامه تعویض دوره‌ای را در نظر بگیریم آنگاه برای MUT داریم:

$$MUT=t_p-t_b\int_0^{t_p}h(t)dt$$

که در آن t_p, t_a و t_b به ترتیب دوره تناوب PM، زمان لازم برای تعویض در PM و CM می‌باشد و h(t) نیز تابع ریسک[5] است که بصورت زیر تعریف می‌شود [10]:

[3] - Weibull
[4] - Rao
[5] - Hazard Function

$$h_j(t) = -\frac{1}{R_j(t)}\frac{dR_j(t)}{dt}; \qquad (j-1)t_p \le t_p \le jt_p$$

اندیس j معرف مرحله PM می‌باشد.
از طرفی دیگر برای MDT نیز داریم:

$$MDT = t_a + t_b\int_0^{t_p} h(t)dt$$

با جایگذاری روابط مربوط به MUT و MDT در رابطه قابلیت دسترسی خواهیم داشت:

$$A = \frac{t_p - t_b\int_0^{t_p} h(t)dt}{t_p + t_a} \quad (*)$$

واضح است که چنانچه بخواهیم قابلیت دسترسی را نسبت به دوره تناوب PM ماکزیمم نمائیم در آنصورت باید رابطه (*) را حداکثر نمائیم که برای آن داریم:

$$\frac{dA}{dt_p} = 0 \quad \Rightarrow \quad (t_p + t_a)h(t_p) - \int_0^{t_p} h(t)dt = \frac{t_a}{t_b} \quad (**)$$

از رابطه فوق t_p بهینه بدست می‌آید.

با توجه به تعریف سه نوع فعالیت برای PM (سرویس‌دهی، تعمیر و تعویض) در آنصورت لازم است که در محاسبه قابلیت دسترسی سیستم درمرحله jام از اجرای PM به این مطلب نیز توجه نمود. بر این اساس می‌توان نوشت [1]:

$$A_{S,j} = \frac{MUT_{S,j}}{MUT_{S,j} + MDT_{S,j}} = \frac{T - t_{b,m}\sum_i^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} h_{i,j}(t)dt}{T + \sum_i^n t_{i,k}} \qquad (***)$$

که در آن:
n: تعداد زیر سیستم‌ها
$t_{i,k}$: زمان PM برای سرویس‌دهی (k=1)، تعمیر (k=2) و تعویض (k=3) در زیرسیستم iام می‌باشد.
$t_{b,m}$: میانگین زمان لازم برای CM که خود بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$t_{b,m} = coffecieant \times t_{a,m}$$

$$t_{a,m} = \frac{\left(t_{a,k=1} + t_{a,k=2} + t_{a,k=2}\right)}{3}$$

۳- ارائه برنامه PM در یک کوره دوار سیمان

همانطوریکه گفته شد در این مقاله یک کوره دوار سیمان را با مولفه‌های آن در نظر گرفته‌ایم. با توجه به اینکه کوره دوار سیمان از اصلی‌ترین سیستم یک کارخانه سیمان به حساب می‌آید لذا یک سیستم بحرانی محسوب شده و از نظر قابلیت دسترسی به آن، قابلیت دسترسی کارخانه در دسترس قرار می‌گیرد.

با توجه به مطالب گفته شده در قسمت تئوری مقاله، جدول (۱) پارامترهای موردنظر فرمول‌ها را برای یک کوره دوار سیمان و زیر سیستم‌های آن را در سیستم واقعی ارائه می‌نماید.

زیر سیستم‌ها	α_i	θ_i	[6]MTBF	t_p	t_a(PM)	t_b(CM)
۱) یاتاقان	۰,۵	۱۳۰۰	۱۱۵۵	۷۶۱	۳۰	۹۰
۲) گیربکس	۰,۶	۲۴۰۰	۲۱۲۷	۱۲۷۸	۵۰	۱۵۰
۳) الکتروموتور	۰,۶	۲۶۰۰	۲۳۲۶	۱۴۰۸	۷۰	۲۱۰
۴) بدنه فلزی	۰,۶	۳۸۰۰	۳۳۹۵	۲۰۶۸	۶۰	۱۸۰
۵) لایه های حرارتی یا آجر نسوز	۰,۵	۲۰۰۰	۱۷۸۷	۱۰۶۶	۸۰	۲۴۰

جدول ۱- مقادیر بدست آمده در زیر سیستم‌های یک کوره سیمان

با توجه به فرمول‌های ارائه شده و نیز براساس سه نوع فعالیت سرویس‌دهی، تعمیر و تعویض در نت می‌توان جدول (۲) را به عنوان نتایج بدست آمده ارائه نمود.

مرحله	زمان (h)	فعالیت‌های PM					قابلیت دسترسی سیستم
j=1	۷۶۱	تعویض	سرویس‌دهی	–	–	سرویس‌دهی	۰,۸۸
j=2	۱۵۲۲	تعویض	تعمیر	تعویض	–	تعویض	۰,۷۱
j=3	۲۲۸۳	تعویض	تعویض	–	تعویض	سرویس‌دهی	۰,۷۴
j=4	۳۰۴۴	تعویض	سرویس‌دهی	تعویض	–	تعویض	۰,۷۳
j=5	۳۸۰۵	تعویض	تعمیر	–	–	سرویس‌دهی	۰,۸۴
j=6	۴۵۶۶	تعویض	تعویض	تعویض	تعویض	تعویض	۰,۶۲

جدول ۲- برنامه‌ریزی‌های PM سیستم در کوره

بنابر جدول (۲) و برساس اجرای برنامه PM با محوریت هر سه نوع فعالیت تعریف شده در آن، میانگین قابلیت دسترسی سیستم برابر خواهد شد با 0.76 و دوره‌های بهینه برای PM نیز بر طبق رابطه (**) بصورت زیر خواهد شد:

$$t_p = \{761, 1278, 1408, 2068, 1066\}$$

حال چنانچه برنامه‌ریزی‌های PM را تنها با محوریت تعویض (k=3) انجام می‌دادیم (یعنی تنها یک فعالیت را در PM تعریف می‌کردیم) در آنصورت جدول (۳) و نتایج بعد از آن حاصل می‌شد.

مرحله	زمان (h)	فعالیت‌های PM					قابلیت دسترسی سیستم
j=1	۷۶۱	تعویض	–	–	–	تعویض	۰,۸۴
j=2	۱۵۲۲	تعویض	تعویض	تعویض	–	تعویض	۰,۶۸
j=3	۲۲۸۳	تعویض	–	–	تعویض	تعویض	۰,۷۵
j=4	۳۰۴۴	تعویض	تعویض	تعویض	–	تعویض	۰,۶۸
j=5	۳۸۰۵	تعویض	–	–	–	تعویض	۰,۸۳
j=6	۴۵۶۶	تعویض	تعویض	تعویض	تعویض	تعویض	۰,۶۱

جدول ۳- برنامه‌ریزی‌های PM تنها با در نظر گرفتن گزینه تعویض برای سیستم

[6] - Mean Time Between Failure

از جدول (۳) میانگین قابلیت اطمینان سیستم برابر ۰,۷۳ خواهد شد که این مقدار پائین‌تر از قابلیت اطمینان بدست آمده در جدول (۲) با شرایط و پارامترهای یکسان می‌باشد. از طرفی دیگر نیز هزینه‌های برنامه موجود در جدول (۳) در سیستم نیز از جدول قبلی بیشتر خواهد شد. در نتیجه محاسبه پارامترهای مذکور طرح جامع و دقیقی به منظور PM بدست می‌آید. در واقع اطلاعات جدید می تواند بعنوان مکمل برنامه PM موجود، استفاده گردد.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از روش‌های جامع قابلیت اطمینانی برای پیش‌بینی و برنامه‌ریزی در امور نگهداری و تعمیرات فوائد فراوانی خواهد داشت. بطور کلی می‌توان فوائد ناشی از استفاده از چنین روش‌هایی را چنین دسته‌بندی کرد:

- افزایش میزان قابلیت اطمینان دستگاه‌ها
- افزایش میزان قابلیت دسترسی دستگاه‌ها
- کاهش نرخ یا تواتر وقوع خرابی‌ها
- افزایش طول عمر اقتصادی و مفید دستگاه‌ها
- افزایش ایمنی و بهبود شرایط کاری

در این مقاله سیاست PM مبتنی بر سه نوع فعالیت سرویس کاری, تعمیر و تعویض با در نظر گرفتن قابلیت دسترسی بهینه سیستم ارائه گردید که نکات زیر در این بررسی قابل توجه می‌باشد:

برنامه PM ارائه شده برای یک سیستم واقعی کاملاً مناسب می‌باشد زیرا محتویات PM ارائه شده براساس خصوصیات فیزیکی سیستم بوده و باعث افزایش عمر سیستم و در نهایت کاهش هزینه نت می‌گردد.

نتایج مطالعه نشان می‌دهد که در نظر گرفتن سه پارامتر سرویس کاری, تعمیر و تعویض بطور همزمان باعث کاهش هزینه نت و افزایش قابلیت دسترسی سیستم می‌شود و این برنامه‌ریزی سودمندتر از حالتی است که تنها پارامتر تعویض را در نظر می‌گیرد.

معمولا قابلیت دسترسی یک سیستم به تدریج باعث کاهش زمان PM می‌شود. در نتیجه محاسبه پارامترهای مذکور طرح جامع و دقیقی بمنظور برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بدست می‌آید. در واقع اطلاعات جدید می‌تواند بعنوان مکمل برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه موجود استفاده گردد.

با استفاده از روش‌های جامع سیستمی می‌توان میانگین زمان تعمیرات دستگاه‌ها را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. بعبارت دیگر، با استفاده از پرسنل مجرب، دستورالعمل‌های مستند و مشخص، بهینه ساختن تعداد پرسنل نگهداری و تعمیرات و از بین بردن یا کاهش مربوط به موجودی قطعات و سیستم‌های مورد استفاده می‌توان میانگین زمان تعمیرات هر یک از دستگاه‌ها یا مکانیزم‌ها را بهینه نمود.

نتایج تجزیه و تحلیل‌های قابلیت دسترسی و قابلیت اطمینانی، اطلاعات بسیار مفیدی را در مورد توانایی بخش تعمیر و نگهداری در مقابله با خرابی‌ها بعلاوه به وضعیت دستگاه‌ها نشان می‌دهند. برای آنکه بتوانیم نتایج بدست آمده را در واحد مورد بررسی اجرا بگذاریم، رعایت کردن نکات ذیل ضروری و لازم به نظر می‌رسد:

- پرسنل و افراد درگیر نگهداری و تعمیرات را با مفاهیم قابلیت اطمینانی و فوائد آن آشنا سازید.
- مجموعه‌ای از قوانین و روش‌های اجرایی که برای پرسنل نگهداری و تعمیرات قابل قبول و آسان باشد را تدوین و ایجاد کنید.
- پرسنل و سرپرستان باید بازخورهای ضروری را به همدیگر برسانند. در واقع بازخور بعنوان یک مکان راهنمایی منجر به خروجی‌های موثر و عقلانی در رابطه با نتایج و تجزیه و تحلیل‌های بدست آمده خواهد شد.
- از افراد زبده و مشخص و متخصص در زمینه آمار مهندسی و علوم قابلیت اطمینانی به منظور برنامه‌ریزی و پیاده‌سازی امور نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه استفاده نمایید.
- از سیستم‌های کامپیوتری بمنظور وارد نمودن اطلاعات، ایجاد بانک اطلاعاتی و تجزیه و تحلیل‌های قابلیت اطمینانی استفاده نمایید.

فرآهم‌کردن اطلاعات بصورت خودکار و ماهرانه برای امور نگهداری و تعمیرات نه تنها سرعت کار را افزایش می‌دهد، بلکه عملکرد

گروه درگیر را از طریق ایجاد قابلیت کشف و تصحیح خطاها بالا می‌برد و متعاقباً کیفیت را نیز ارتقاء می‌دهد. این امر بویژه در واحدهای صنعتی بزرگ و پیچیده صادق می‌باشد.

- اجرای چنین برنامه‌هایی بدون پشتیبانی و کنترل مستقیم مدیریت بالای واحد مورد نظر تقریباً غیر ممکن است.

منابع و مراجع

1. Lie CH, Chun YH. An algorithm for preventive maintenance policy. IEEE Trans Reliab 1986;35/1:71–5.
2. Jayabalan V, Chaudhuri D. Cost optimization of maintenance scheduling for a system with assured reliability. IEEE Trans Reliab 1992;41/1:21–5.
3. Aven T, Dekker R. A useful framework for optimal replacement models. Reliab Engng Syst Safety 1997;58/2:61–7.
4. Zheng X. All opportunity-triggered replacement policy for multipleunit systems. IEEE Trans Reliab 1995;44/4:648–52.
5. Legat V, Zaludora AH, Cervenka V, Jurca V. Contribution to optimization of preventive replacement. Reliab Engng Syst Safety 1996;51/3:259–66.
6. Wang KS, Tsai YT, Lin CH. A study of replacement policy for key components in a mechanical system. Reliab Engng Syst Safety 1997;
7. Whitaker LR, Samaniego FJ. Estimating the reliability of systems subject to imperfect maintenance. J Am Stat Assoc 1989;84/405: 301–9.
8. Martorell S, Munoz A, Serradell V. Age-dependent models for evaluating risks and costs of surveillance and maintenance of systems. IEEE Trans Reliab 1996;45/3:433–41.
9. Martorel S, Sanchez A, Serradell V. Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. Reliab Engng Syst Safety 1999;64/1:19–31.
10. Rao SS. Reliability-base design. New York: McGraw-Hill; 1993.
11. Ebeling CE. In introduction to reliability and maintainability engineering. New York: McGraw-Hill; 1997.