مهندسی صنایع و مدیریت شریف
دوره‌ی ۱-۲۸، شماره‌ی ۲، ص. ۱۳۳-۱۴۰، (یادداشت فنی)

Research Note

بهره‌گیری از رویکرد RCM به‌منظور افزایش همزمان اثربخشی و کارایی در فرایند نگه‌داری و تعمیرات (مطالعه‌ی موردی در شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی)

حسام راشدی (کارشناس ارشد)
محمدصالح اولیاء * (دانشیار)
حسن حسینی‌نسب (دانشیار)
یحیی زارع مهرجردی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

با وجود گزارش‌های متعدد از موفقیت «نگه‌داری مبتنی بر اطمینان (RCM)[1]» در کشورهای پیشرفته‌ی صنعتی، پیاده‌سازی آن در ایران و کشورهای در حال توسعه چندان موفق نبوده است. توجه بیش از اندازه‌ی متخصصین به روش‌های اجرایی، و غفلت آن‌ها از مفاهیم زیربنایی و اصول پایه یکی از مشکلات اساسی و موانع پیاده‌سازی و اجرای اثربخش RCM متناسب با زیرساخت‌ها و شرایط حاکم بر صنایع کشورمان بوده است. در این نوشتار با بهره‌گیری از مفاهیم زیربنایی RCM و استفاده‌ی تلفیقی از تکنیک‌های FMEA، نمودار علت و معلول و شبیه‌سازی رایانه‌یی، مدلی اجرایی در پاسخ به محدودیت‌های حاکم بر صنایع کشورمان ارائه‌شده و عملکرد آن در مطالعه‌ی موردی ارزیابی شده است. ارزیابی نتایج حاکی از افزایش همزمان اثربخشی و کارایی در فرایند نگه‌داری و تعمیرات مطابق با اجرای موفقیت‌آمیز مدل پیشنهادی است.

hesam_rashedi@yahoo.com
owliams@gmail.com
hhn@yazduni.ac.ir
yazm2000@yahoo.com

واژگان کلیدی: RCM، FMEA، تحلیل ریشه‌یی خرابی‌ها، شبیه‌سازی رایانه‌یی.

۱. مقدمه

با پذیرش فلسفه‌ی مشهور پیشگیری قبل از درمان، تردیدی در لزوم برقراری تعمیرات پیشگیرانه در صنایع مختلف وجود ندارد. اما تعمیرات پیشگیرانه‌ی سنتی با تأکید بر بازرسی‌های چشم‌بسته و اکتفاکردن به دانش تجربی تعمیرکاران جواب‌گوی صنایع روبه روشد و فناوری پیچیده‌ی امروزی نیست.[1] زیاده‌روی در تعمیرات پیشگیرانه، تحمیل هزینه‌های گزاف به سازمان و کاهش حاشیه سود و از سوی دیگر تخفیف در آن، افزایش خرابی‌های پیش‌بینی‌نشده‌ی ماشین‌آلات و توافقات خارج از برنامه‌ی تولید را در پی دارد.[2و3] به‌علاوه در بسیاری از صنایع حساس ــ نظیر حمل‌ونقل هوایی یا فنّاوری هسته‌یی ــ خرابی‌های پیش‌بینی نشده‌ی ماشین‌آلات به‌دلیل ملاحظات ایمنی اساساً پذیرفتنی نیست.[4] نخستین‌بار در صنایع هوایی آمریکا در دهه‌ی ۱۹۶۰، هزینه‌های سرسام‌آورِ دستورالعمل‌های سخت‌گیرانه‌ی ابلاغی از شرکت هواپیمایی بوئینگ برای انجام تعمیرات پیشگیرانه‌ی هواپیماهای تولیدی در این شرکت، متخصصین را ناگزیر از چاره‌اندیشی برای کاهش هزینه‌های تعمیرات همزمان با حفظ قابلیت اطمینان بالای تجهیزات در حین کار و شرایط عملیاتی کرد.[5] در سال‌های اخیر گزارش‌های متعددی در به‌کارگیری تکنیک‌های مختلف در مهندسی نگه‌داری و تعمیرات ارائه شده است. برخی از محققین از نمودار علّت و معلول[2] در شناسایی و حذف ریشه‌یی علل خرابی در موتور فضاپیما در یک سازمان هوافضا استفاده کرده‌اند.[6] برخی نیز با ارائه‌ی سیستم نگه‌داری و تعمیرات مبتنی بر ریسک، از نمودار مذکور به‌منظور تعیین عوامل مؤثر بر اهمیت ریسک‌های ناشی از خرابی بهره گرفته‌اند.[7] همچنین از ارزیابی ریسک‌های خرابی (FMEA)[3] برای تعیین عوامل بحرانی خرابی در طراحی روبات به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان استفاده شده است.[8]

در سال ۲۰۰۹، با تأکید بر ماهیت گروهی FMEA و مشکلات ناشی از رسیدن اعضا به اجماع، شیوه‌ی جدیدی با استناد به شواهد در تعیین عدد اولویت ریسک (RPN)[4] برای تحلیل ریسک‌های ناشی از خرابی ماشین‌آلات در صنایع کشتی‌سازی ارائه شد.[9] شیوه‌ی متفاوتی از این روش (FMEA) برای ارزیابی ریسک مبتنی‌بر هزینه، و به‌منظور مقایسه و انتخاب روش‌های مختلف طراحی با هدف کاهش خرابی‌ها و هزینه‌ی نهایی عمر دستگاه به کار گرفته شده است.[10] برای این منظور از شبیه‌سازی رایانه‌یی در محاسبه و تخمین هزینه‌های ناشی از زمان

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۱/۲۸، اصلاحیه ۱۳۸۹/۶/۲۲، پذیرش ۱۳۸۹/۹/۲.

تشخیص خرابی، زمان تعمیر، تعداد خرابی، و مدت توقف براساس یک سناریوی پیچیده استفاده شده است.[۱۰] محققین از شبیه‌سازی به‌منظور ارزیابی راهکارهای تعویض در تأسیسات همسان استفاده کرده‌اند.[۱۱] آنان همچنین شبیه‌سازی را برای پیش‌بینی زمان خرابی تجهیزات برمبنای تخمین رشد ترک‌های قطعات در نگه‌داری و تعمیرات مبتنی بر شرایط به کار گرفته‌اند.[۱۲] نکته‌ی قابل توجه در این پژوهش‌ها آن است که با وجود ارائه‌ی شیوه‌های متعدد، افزایش هم‌زمان اثربخشی و کارایی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته و معمولاً نسبت به یکی از آن‌ها غفلت شده است. به‌علاوه، با وجود تنوع روش‌ها، ترکیب هدف‌مند و یک‌پارچه‌سازی آن‌ها در جهت تکمیل یکدیگر، اغلب تحت‌الشعاع توسعه‌ی مستقل هریک از آن‌ها قرار گرفته است.

از سوی دیگر، نگه‌داری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) از جمله رویکردهایی است که در سال‌های اخیر از اقبال مناسبی در این رابطه برخوردار بوده است. RCM یک چارچوب راهبردی کاربردی است که برای اطمینان از عملکرد یک سیستم مطابقِ سطح انتظار استفاده کننده به کار گرفته می‌شود.[۱۳] براساس مفاهیم زیربنایی، RCM مشخصاً بر سه هدف اصلی تأکید دارد: افزایش قابلیت اطمینان سیستم با تأکید بر پراهمیت‌ترین وظایف، تأکید بر حذف یا دست‌کم تسکین پیامدهای خرابی، و در نهایت کاهش هزینه‌های تعمیراتی با تأکید بر حذف فعالیت‌های غیر ضروری.[۵] در روش کلاسیک پیامدهای خرابی به چهار گروه اصلی دسته‌بندی می‌شوند: ۱. ایمنی و محیط زیست؛ ۲. عملیاتی و توقف تولید؛ ۳. غیر عملیاتی؛ ۴. خرابی‌های پنهان. سپس این دسته‌بندی به‌عنوان یک چارچوب راهبردی برای اتخاذ سیاست‌های تعمیراتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

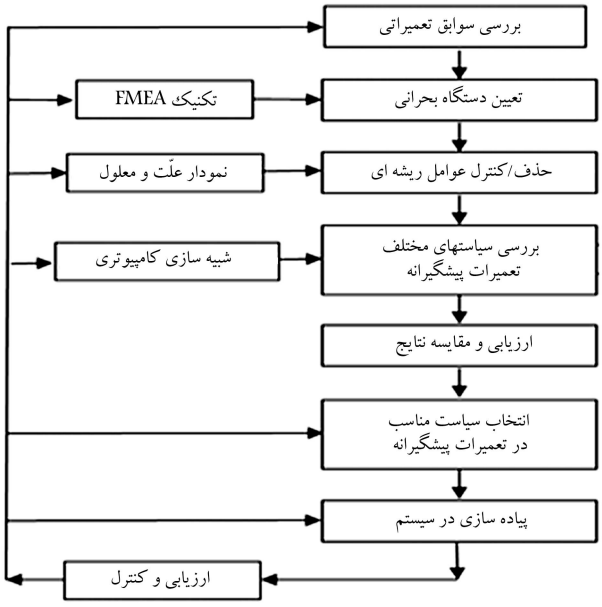
با وجود جذابیت‌های نظری و گزارش‌های موفقیت‌آمیز از اجرای RCM در کشورهای صنعتی، این رویکرد در کشورهای در حال توسعه، نظیر ایران، عملاً با مشکلات متعددی همراه بوده است. به‌طوری که در بسیاری از موارد سازمان‌ها از پیاده‌سازی پروژه‌های مربوط به آن ناکام مانده‌اند. با مرور ادبیات موضوع درمی‌یابیم که پنج عامل را می‌توان به‌عنوان دلایل اصلیِ این ناکامی‌ها دانست:[۱و۵] ۱. حجم گسترده‌ی منابع مورد نیاز شامل زمان، نیروی انسانی متخصص و سرمایه‌گذاری مالی برای اجرای پروژه‌ها؛ ۲. زمان‌بر بودن پروژه‌ها با اهداف دو تا سه‌ساله، در حالی که اغلب نتایج کوتاه‌مدت از آن‌ها انتظار می‌رود و این سبب ناامیدی و سرخوردگی مدیران در اثر سرمایه‌گذاری بدون بازگشت سرمایه و عدم افزایش سود در کوتاه‌مدت می‌شود؛ ۳. ناتوانی متخصصین و مجریان در متقاعدسازی و جلب همکاری مدیران و کارکنان در سطوح مختلف سازمان به‌دلیل ضعف در تشریح مزایا و ارزش‌های ناشی از پیاده‌سازی پروژه‌ها و طرح‌های تعمیراتی؛ ۴. حجم بالای تجهیزات و ضعف در گردآوری، دسته‌بندی و تحلیل داده‌های حاصل از سوابق تعمیراتی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، با توجه به ضعف سیستم‌های اطلاعاتی؛ ۵. محدودیت‌های ناشی از تحمیل ریسک‌های ایمنی، خسارت‌ها و هزینه‌های ناشی از انحرافات احتمالی در اجرای طرح‌های پیشنهادی.

در کنار عوامل یادشده، توجه بیش از اندازه به روش‌های اجرایی و در مقابل، غفلت از مفاهیم زیربنایی و اصول پایه در پیاده‌سازی RCM به‌عنوان یک عامل کلیدی در این پژوهش مورد توجه قرارگرفته است. براین اساس در نوشتار حاضر مدلی اجرایی با بهره‌گیری از مفاهیم زیربنایی RCM و استفاده‌ی تلفیقی از تکنیک‌های مختلف در پاسخ به محدودیت‌های حاکم بر صنایع کشورمان، با هدف افزایش همزمان اثربخشی و کارایی در فرایند نگه‌داری و تعمیرات ارائه شده و نتایج آن در مطالعه‌ی موردی ارزیابی شده است.

۲. متدولوژی تحقیق

گام‌های اجرایی تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است. مطابق شکل ابتدا براساس تحقیقات میدانی و بررسی سوابق تعمیراتی، ریسک خرابی در تجهیزات مختلف با بهره‌گیری از تکنیک FMEA ارزیابی و اولویت‌بندی می‌شود. در مرحله‌ی بعد، با تحلیل ریشه‌یی خرابی‌ها در نمودار علّت و معلول، اقدامات اصلاحی برای حذف یا کنترل ریشه‌های خرابی ارائه می‌شود. با پیاده‌سازی اقدامات اصلاحی تعداد خرابی‌ها به‌نحو قابل توجهی کاهش می‌یابد اما با توجه به فرسایش طبیعی قطعات در اثر استهلاک، برقراری تعمیرات پیشگیرانه در بازه‌های زمانی مناسب ضروری است. با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌یی بازه زمانی انجام تعمیرات پیشگیرانه براساس تحلیل هزینه‌ها و مقایسه‌ی همزمان سیاست‌های مختلف تعمیراتی تعیین می‌شود.

چنان که ذکر شد، با توجه به ناکامی مدل‌های کلاسیک RCM درکشورمان، در این پژوهش ارائه‌ی یک مدل اجرایی با بهره‌گیری از رویکرد RCM و با تأکید بر مفاهیم زیربنایی آن مد نظر قرار دارد. جدول ۱ ارتباط مدل پیشنهادی را با سه رویکرد اصلی در RCM نشان می‌دهد. براین اساس اولویت‌بندی تجهیزات و تعیین دستگاه بحرانی با رویکرد نخست RCM برمبنای تأکید بر پراهمیت‌ترین وظایف، حذف یا کنترل عوامل ریشه‌یی خرابی؛ با رویکرد دوم برمبنای حذف یا تسکین پیامدهای خرابی و انتخاب سیاست بهینه برای تعمیرات پیشگیرانه؛ و با رویکرد سوم برمبنای کاهش هزینه‌ها با حذف فعالیت‌های غیرضروری مطابقت دارد. به‌علاوه روش کار به‌گونه‌یی انتخاب شده که با ترکیب و یکپارچه‌سازی شیوه‌های مختلف محدودیت‌های ذکرشده در مرور ادبیات موضوع نیز مورد توجه قرارگیرد. به‌طوری که انتخاب دستگاه بحرانی با استفاده از تکنیک FMEA و حذف یا کنترل عوامل ریشه‌یی خرابی با استفاده از نمودار علت و معلول، در پاسخ به محدودیت‌های اول و چهارم[۵] شامل حجم گسترده منابع مورد نیاز، حجم بالای تجهیزات و ضعف سیستم‌های اطلاعاتی است. این رویکردکمک می‌کند تا با یک اولویت‌بندی مشخص برای دسته‌های مختلف تجهیزات، امکان انتخاب دستگاه یا دستگاه‌های بحرانی به‌منظوراجرای پروژه مطابق با منابع موجود فراهم شود. همچنین



شکل ۱. گام‌های اجرایی تحقیق.

جدول ۱. انطباق گام‌های اجرایی تحقیق با رویکرد RCM.

ردیف	گام‌های اجرایی تحقیق	رویکرد متناظر در RCM	وجه انطباق
۱	تعیین دستگاه بحرانی	تأکید بر پر اهمیت‌ترین وظایف	اولویت‌بندی تجهیزات
۲	حذف یا کنترل عوامل ریشه‌یی خرابی	حذف یا تسکین پیامدهای خرابی	تحلیل ریشه‌یی خرابی‌ها
۳	انتخاب سیاست تعمیرات پیشگیرانه	کاهش هزینه‌ها با حذف فعالیت‌های غیر ضروری	هدفمندسازی تعمیرات پیشگیرانه

با وجود ضعف سیستم‌های اطلاعاتی، امکان تمرکز بیشتر و دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر میسر می‌شود. استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌یی به‌منظور انتخاب سیاست بهینه‌ی تعمیرات پیشگیرانه در پاسخ به محدودیت‌های دوم، سوم و پنجم صورت پذیرفته است. شبیه‌سازی رایانه‌یی امکان پیاده‌سازی و ارزیابی سیاست‌های مختلف تعمیراتی را در کوتاه‌ترین زمان و فارغ از ریسک‌های ناشی از پیاده‌سازی آن‌ها در سیستم واقعی فراهم می‌آورد. به‌علاوه با ارائه‌ی تخمین قابل قبولی از نتایج و عواید ناشی از اجرای پروژه نقش قابل توجهی در جلب همکاری و متقاعدسازی مدیران سازمان ایفا می‌کند.

۳. تعیین دستگاه بحرانی

در این مطالعه تعیین دستگاه بحرانی براساس ارزیابی ریسک‌های خرابی (FMEA) انجام می‌شود. FMEA یک ابزار مهندسی است که به‌طور کلی در شناسایی، اولویت‌بندی و حذف خرابی‌ها یا خطاهای بالقوه کاربرد دارد.[۱۰] این تکنیک نخستین‌بار در سال ۱۹۶۳ در سازمان ملی و هوافضای آمریکا (NASA)[۶]، در پروژه‌ی Apollo.۱۱ با توجه به اهمیت و حساسیت مسائل مرتبط با ایمنی در صنایع هوافضا و به‌منظور پیشگیری از بروز حوادث احتمالی به کار گرفته شد. پس از آن، Apollo.۱۱ با ورود به صنایع خودروسازی به شهرت جهانی دست یافت، به‌طوری که امروزه در صنایع مختلف کاربرد گسترده‌یی دارد.[۱۴و۱۵] دراین روش درجه اهمیت خرابی، با عدد اولویت ریسک (RPN) تعیین می‌شود. RPN براساس حاصل‌ضرب سه فاکتور وقوع (O)[۷]، شدت (S)[۸] و کشف (D)[۹] که توسط تیم FMEA از ۱ تا ۱۰ امتیازبندی می‌شوند، محاسبه می‌شود، به‌طوری که RPN بیشتر بیان‌گر اولویت ریسک بالاتر است.[۹] در این پژوهش با تشکیل تیمی متشکل از کارشناسان فنی و پس از بررسی سوابق تعمیراتی، ابتدا ده گروه اصلی تجهیزات شناسایی، و سپس عدد اولویت ریسک برای حالت‌های مختلف خرابی محاسبه و اولویت‌بندی شد. یادآور می‌شود با توجه به وجود تجهیزات یکسان در سایت‌های عملیاتی مشابه، به‌منظور جامعیت بیشتر در ارزیابی و اطمینان از نتایج محاسبات، با در نظرگرفتن وقوع خرابی‌ها در همه‌ی سایت‌ها ــ فارغ از نوع خرابی و در بدبینانه‌ترین حالت ممکن ــ ارزیابی عوامل صورت گرفته و در انتها نیز براساس سخت‌گیرانه‌ترین شرایط مقایسه‌ی نهایی صورت پذیرفته است. طبق نتایج به دست آمده از جدول ۲ در نهایت «پمپ تزریق» با بیشترین عدد اولویت ریسک (۳۸۴) به‌عنوان دستگاه بحرانی تعیین شده است.

۴. حذف یا کنترل عوامل ریشه‌یی خرابی

چنان که پیش‌تر ذکر شد، در اصل اجرای تعمیرات پیشگیرانه تردیدی وجود ندارد. اما هزینه‌ی بالای تعمیرات پیشگیرانه از یک سو، و لزوم جلوگیری از خرابی‌های پیش‌بینی نشده خصوصاً در صنایع حساسی نظیر تولید نفت و گاز از سوی دیگر، حذف علل ریشه‌یی خرابی را گریزناپذیر ساخته است. در این پژوهش تحلیل ریشه‌یی عوامل

جدول ۲. ارزیابی ریسک‌های خرابی براساس تکنیک FMEA.

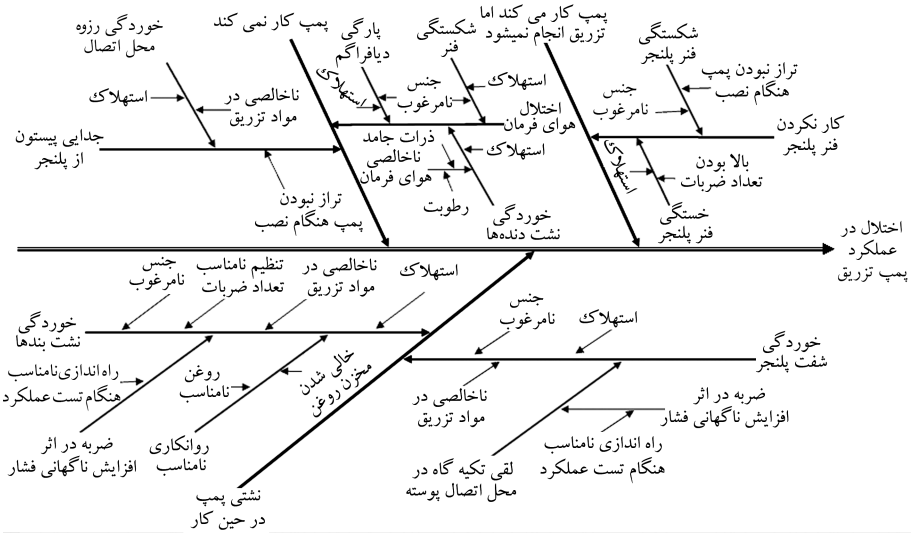
ردیف	نام تجهیز	(S)	(O)	(D)	(RPN)
۱	پمپ تزریق	۸	۸	۶	۳۸۴
۲	تابلو کنترل	۶	۷	۶	۲۵۲
۳	Metering system	۵	۶	۵	۱۵۰
۴	۳S. Valve	۸	۵	۳	۱۲۰
۵	K.O. Dram	۶	۴	۳	۷۲
۶	X-Tree	۵	۳	۴	۶۰
۷	۲S. Valve	۸	۲	۳	۴۸
۸	کاهنده ثابت/متغیر	۷	۲	۳	۴۲
۹	E.S.D. Valve	۷	۲	۳	۴۲
۱۰	تابلو توزیع برق	۴	۳	۳	۳۶

خرابی[۱۰] با استفاده از نمودار علّت و معلول ــ که نخستین‌بار در سال ۱۹۴۳ توسط ایشی‌کاوا[۱۱] هنگام تدریس در دانشگاه توکیو معرفی شد ــ صورت می‌پذیرد. این نمودار که به استخوان ماهی (اصطلاحاً تیغ‌ماهی) شباهت دارد، با دسته‌بندی عوامل مختلف و آشکارساختن ارتباط آن‌ها با یکدیگر، امکان تحلیل و ریشه‌یابی پدیده‌های مختلف را با جزئیات کامل، در عین سادگی برای تحلیل‌گران فراهم می‌آورد.[۱۶] ابتدا مطابق شکل ۲، نمودار علّت و معلول به‌منظور تحلیل و ریشه‌یابی عوامل خرابی در پمپ تزریق و با همکاری تیم کارشناسی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی بعد راهکارهای اصلاحی به‌منظور حذف یا کنترل عوامل مشخص‌شده، توسط تیم ارائه شده است (جدول ۳).

۵. شبیه‌سازی رایانه‌یی

در این پژوهش از شبیه‌سازی مونت‌کارلو[۱۲] برای مدل‌سازی رفتار سیستم به‌منظور ارزیابی سیاست‌های مختلف نگه‌داری و تعمیرات استفاده شده است. مونت‌کارلو شیوه‌ی بسیار ارزش‌مندی است که امروزه در حل مسائل واقعی در علوم مختلف مهندسی کاربرد گسترده‌یی دارد.[۱۷] ایده‌ی اصلی در این روش ایجاد مجموعه‌ی مشخصی از اعداد تصادفی با توزیع‌های احتمالی مشخص، به‌منظور خلق یک سناریوی واقع‌بینانه در خصوص بخشی از دوره‌ی حیات یک سیستم واقعی براساس وقوع پیشامدهای گسسته در یک مدل رایانه‌یی است.

مدل شبیه‌سازی شده با استفاده از رایانه در دفعات متعدد اجرا شده و براساس آن سیاست بهینه‌ی تعمیرات پیشگیرانه انتخاب می‌شود. لذا شبیه‌سازی ما را قادر می‌سازد تا بدون در نظرگرفتن فرضیات محدودکننده‌ی ناشی از تطبیق مدل با راه حل‌های محاسباتی، و فارغ از پذیرفتن ریسک‌ها و هزینه‌های تحمیلی ناشی از خطاهای احتمالی در پیاده‌سازی مدل واقعی، جنبه‌های متنوعی از عملکرد یک سیستم را مورد تحلیل و ارزیابی قرار دهیم.[۱۸]



شکل ۲. نمودار علّت و معلول.

جدول ۳. راهکارهای اصلاحی.

ردیف	عوامل ریشه‌یی	اقدامات اصلاحی
۱	ترازنبودن پمپ در هنگام نصب	آموزش اپراتورها
۲	ناخالصی‌های خورنده در مواد تزریق	نصب فیلتر در مسیر ورودی مواد به پمپ
		برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه برای تخلیه رسوبات مخزن
۳	ذرات جامد در هوای فرمان	نصب فیلتر سیلکونی در مسیر هوای ورودی
۴	رطوبت در هوای فرمان	برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه برای تخلیه رطوبت مخزن تامین هوا
		نصب فیلتر رطوبت‌گیر در مسیر هوای ورودی
۵	تنظیم نامناسب تعداد ضربات تزریق	تعیین تعداد ضربات مطابق با کتابچه فنی
		آموزش اپراتورها
۶	روان‌کاری نامناسب نشت‌بندها	استفاده از روغن مناسب مطابق با کتابچه فنی
		برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه برای اطمینان از پربودن مخزن روغن
۷	راه‌اندازی نامناسب در هنگام آزمایش	آموزش اپراتورها
۸	جنس نامرغوب قطعات	بازرسی مشخصات قطعات مطابق با کتابچه فنی در هنگام تحویل
۹	استهلاک قطعات	برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه برای تعویض قطعات قبل از خرابی

جدول ۴. جمع‌آوری داده‌های شبیه‌سازی.

فاصله‌ی خرابی (شیفت)	مدت تأخیر (ساعت)	فاصله‌ی خرابی (شیفت)	مدت تأخیر (ساعت)	فاصله‌ی خرابی (شیفت)	مدت تأخیر (ساعت)	فاصله‌ی خرابی (شیفت)	مدت تأخیر (ساعت)
۲۷	۲	۶۰	۸	۸۷	۵	۲۴	۳
۳۳	۷	۳۰	۴	۴۸	۴	۱۸	۸
۱۲	۴	۵۱	۵	۲۹	۵	۶۳	۵
۳۹	۶	۱۸	۴	۴۲	۳	۳۳	۴
۱۲	۲	۲۷	۵	۱۳۲	۷	۳۳	۹
۴۲	۳	۹۰	۱	۴۸	۶	۵۴	۳
۱۱۱	۸	۴۲	۴	۳۳	۴	۶۳	۶
۱۲۹	۱	۱۵	۵	۴۵	۵		
۱۸	۶	۱۲۶	۶	۷۸	۳		
۲۱	۹	۹۶	۴	۵۷	۶		
۵۱	۳	۳۰	۷	۹	۵		
۳۳	۹	۶	۳	۱۲	۲		
۱۸	۳	۵۴	۲	۳۹	۷		

۱.۵. مطالعه‌ی رفتار واقعی سیستم

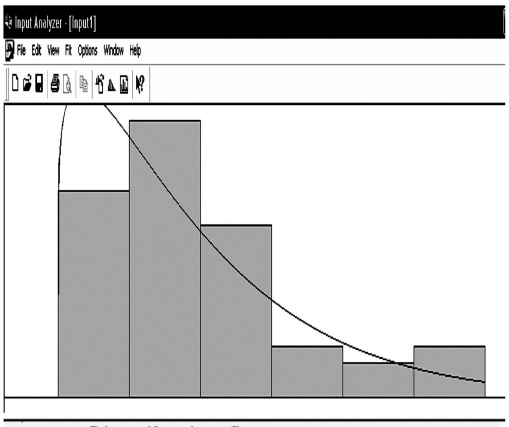
نیروی محرکه‌ی هر مدل شبیه‌سازی را داده‌های ورودی آن تشکیل می‌دهند، لذا صرف وقت در جمع‌آوری و تحلیل داده‌های واقعی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.[۱۹] از این رو براساس بررسی سوابق در بخش قبلی، داده‌های مربوط به فاصله‌ی زمانی خرابی‌ها و مدت زمان تأخیر در انجام تعمیرات اضطراری مطابق با جدول ۴ در یک بازه زمانی دوساله (معادل ۲۱۳۶ شیفت کاری) بدون انجام تعمیرات پیشگیرانه جمع‌آوری و با استفاده از نرم‌افزار Arena ۱۰/۰ مورد تحلیل قرار گرفت. براساس محاسبات رایانه‌یی که گزارش آن به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده، با بررسی توابع آماری مختلف فاصله زمانی خرابی‌ها مطابق با توزیع (۱/۱۴ و ۶+۴۲/۱) Weibull و زمان تأخیر در انجام تعمیرات پس از خرابی مطابق با توزیع (۲/۱ و ۴/۸۸) N برآورد می‌شوند.

۲.۵. پیش‌فرض‌های شبیه‌سازی

۱. با توجه به آن که کشف خرابی‌ها براساس شیفت‌های کاری هشت‌ساعته انجام می‌پذیرد و در حالت کلی امکان بروز دو خرابی در یک شیفت وجود ندارد، شیفت کاری به‌عنوان واحد اندازه‌گیری فاصله زمانی میان خرابی‌ها در نظر گرفته شده است.

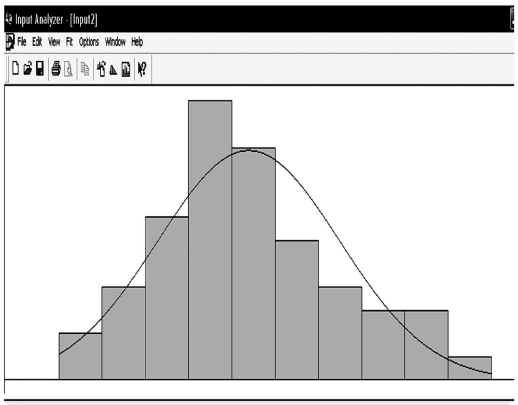
۲. با توجه به رویه‌های داخلی در سازمان مورد بررسی، برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه به‌صورت هفتگی انجام می‌شود؛ هر هفته معادل ۲۱ شیفت کاری است.

۳. هزینه‌های مربوط به تعمیرات پیشگیرانه، تعمیرات پس از خرابی (اضطراری)




```
        Distribution Summary

Distribution:   Weibull
Expression:     6 + WEIB(42.1, 1.14)
Square Error:   0.022328

Chi Square Test
  Number of intervals   = 4
  Degrees of freedom    = 1
  Test Statistic        = 3.73
  Corresponding p-value = 0.0551

Kolmogorov-Smirnov Test
  Test Statistic        = 0.103
  Corresponding p-value > 0.15

        Data Summary

Number of Data Points   = 46
Min Data Value          = 6
Max Data Value          = 132
Sample Mean             = 46.4
Sample Std Dev          = 32.4
```

شکل ۳. تابع توزیع وقوع خرابی (Arena۱۰/۰).




```
        Distribution Summary

Distribution:   Normal
Expression:     NORM(4.88, 2.1)
Square Error:   0.008214

Chi Square Test
  Number of intervals   = 7
  Degrees of freedom    = 4
  Test Statistic        = 2.97
  Corresponding p-value = 0.568

        Data Summary

Number of Data Points   = 52
Min Data Value          = 1
Max Data Value          = 10
Sample Mean             = 4.88
Sample Std Dev          = 2.12
```

شکل ۴. تابع توزیع مدت زمان تأخیر (Arena۱۰/۰).

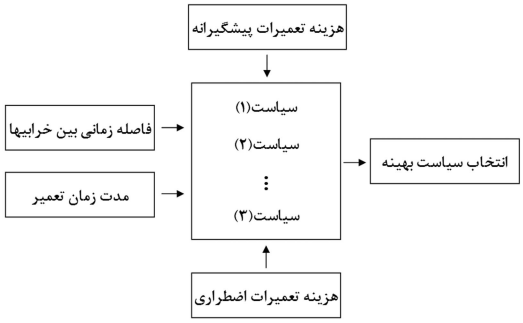
و هر ساعت توقف دستگاه براساس تحقیقات میدانی با نظر تیم کارشناسان مطابق جدول ۵ تعیین شده است. لازم به ذکر است که با توجه به مشکلات تعمیرات خارج از برنامه ــ نظیر تأمین به‌موقع کالا، ابزارالات و آماده‌سازی تیم‌های تعمیراتی ــ هزینه‌ی تعمیرات پس از خرابی نسبتاً بیشتر از تعمیرات پیشگیرانه در نظر گرفته شده است.[۲۰]

۴. با توجه به تحلیل داده‌های مربوط به فاصله‌ی زمانی بین خرابی‌ها که پیش‌تر بدان اشاره شد، تابع توزیع Weibull برای ایجاد اعداد تصادفی وقوع خرابی‌ها در مدل شبیه‌سازی انتخاب شده است. Weibull یک توزیع بسیار کارآمد و انعطاف‌پذیر است که با تنظیم مقادیر پارامترهای خود، قابلیت سازگاری با تنوع وسیعی از الگوهای وقوع خرابی را دارد و در بسیاری از پژوهش‌های معتبر دیگر نیز، به‌همین منظور مورد استفاده قرار گرفته است.[۲۱-۲۳] همچنین با هر بار انجام تعمیرات پیشگیرانه، عمر دستگاه از صفر محاسبه می‌شود.[۲۴و۲۵]

۵. پس از انجام اقدامات اصلاحی در مرحله‌ی تحلیل ریشه‌یی خرابی‌ها، تابع توزیع وقوع خرابی به (۲/۱۹ و ۸۴+۲۳/۵) Weibull تغییر می‌کند. این فرض براساس تحقیقات میدانی و تحلیل مجدد سوابق خرابی پس از پیاده‌سازی اقدامات اصلاحی در نظر گرفته شده است.

جدول ۵. تخمین هزینه‌های تعمیر پیشگیرانه‌ی اضطراری و تأخیر.

موضوع	میزان هزینه
هر بار تعمیر پیشگیرانه	۳۰۰ هزار ریال
هر بار تعمیر اضطراری	۵۴۰ هزار ریال
هر ساعت تأخیر	۱۵۰ هزار ریال



شکل ۵. توسعه مدل مفهومی.

۶. مدت زمان تأخیر در انجام تعمیرات پس از خرابی از توزیع نرمال (۲/۱۲ و N(۴/۸ مطابقت می‌کند و انجام اقدامات اصلاحی تأثیری بر آن ندارد.

۷. در تحلیل هزینه‌ها از هزینه‌های مربوط به ریشه‌یابی خرابی‌ها و انجام اقدامات اصلاحی صرف‌نظر شده است. این فرض با توجه به ناچیزبودن آن‌ها در مقایسه با سایر هزینه‌ها منظور شده است.

۸. مسلماً علاوه بر فاصله‌ی زمانی خرابی‌ها و مدت زمان تعمیر، متغیرهای دیگری نیز می‌توانند در تعیین سیاست‌های تعمیراتی مؤثر واقع شوند. اما با توجه به تعدد متغیرها و پیچیدگی مدل براساس تحقیقات میدانی انجام‌شده در مطالعه‌ی موردی، سایر متغیرها ثابت فرض شده یا به‌طور غیرمستقیم و به‌واسطه‌ی تأثیر در متغیرهای اصلی و تخمین هزینه‌ها در مدل پیشنهادی لحاظ شده‌اند.

۳.۵. مدل‌سازی و اجرا

مدل مفهومی شبیه‌سازی در شکل ۵ ارائه شده است. مطابق با شکل فاصله‌ی زمانی میان خرابی‌ها و مدت زمان تأخیر در انجام تعمیرات اضطراری به‌عنوان متغیرها و هزینه‌های تعمیراتی، شامل هزینه‌ی تعمیرات پیشگیرانه و هزینه‌ی تعمیرات اضطراری دو محدودیت اصلی در سیستم مورد مطالعه محسوب می‌شوند. در مقابل تعداد خرابی‌ها و مجموع هزینه‌های تعمیراتی به‌عنوان معیارهای تصمیم‌گیری مد نظر قرار دارند. اتخاذ هریک از سیاست‌های تعمیراتی سطح متفاوتی از تعداد خرابی‌ها و مجموع هزینه‌های تعمیراتی را در پی خواهد داشت.

براین اساس و با در نظرگرفتن پیش‌فرض‌های فوق و توسعه‌ی برنامه‌ی رایانه‌یی در نرم‌افزار Excel، مدل شبیه‌سازی ایجاد شد. در ابتدا وقوع خرابی‌ها و مدت زمان تأخیر در انجام تعمیرات، با تولید اعداد تصادفی مطابق با توزیع‌های به دست آمده شبیه‌سازی شد. سپس برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه در دو مرحله، نخست بدون در نظرگرفتن تحلیل ریشه‌یی و اقدامات اصلاحی، و در مرحله‌ی بعد پس از پیاده‌سازی آن‌ها در مدل شبیه‌سازی اعمال شد. به‌طوری که هربار سیاست‌های پیشنهادی شامل تعمیرات پیشگیرانه یک تا پنج‌هفته‌یی، در مدل رایانه‌یی پیاده‌سازی شد. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج، اجرای مدل براساس یک بازه زمانی معین، معادل با ۲۱۳۶ شیفت کاری با استفاده از ۱۰۰۰۰ عدد تصادفی تکرار و میانگین نتایج محاسبه شد. خلاصه‌یی از نتایج به دست آمده در جدول ۶ ارائه شده است.

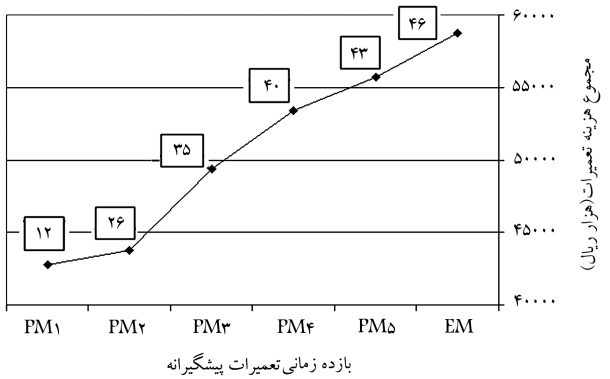
۶. ارزیابی و تحلیل

در ابتدا اعتبارسنجی نتایج مطابق با ارزیابی کیفی کارشناسان صورت پذیرفت. برای این منظور خلاصه‌یی از کلیات مسئله به‌همراه نتایج تحقیق در اختیار کارشناسان مربوطه در داخل و خارج سازمان قرار گرفت. به‌جز چند مورد که ارزیابی‌ها به‌دلیل سوء برداشت در محدودیت‌ها و کلیات مسئله دچار مشکل شده بود ــ و با توضیح مجدد و روشن ساختن ابهامات مسئله، اختلاف نظرها برطرف شد ــ یافته‌های تحقیق مورد تأیید قرار گرفت و به‌عنوان معیار اعتبارسنجی مدل در پژوهش حاضر منظور شد.

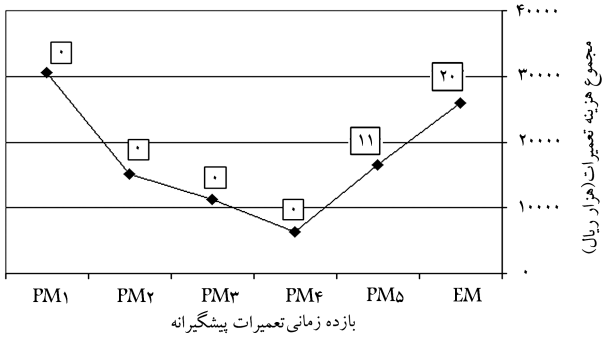
سپس تحلیل نتایج مطابق شکل ۶ انجام پذیرفت. در رویکرد اول بدون در نظرگرفتن اقدامات اصلاحی درخصوص عوامل ریشه‌یی، تعمیرات پیشگیرانه‌ی یک‌هفته‌یی در مقایسه با سایرگزینه‌ها با کم‌ترین هزینه انتخاب می‌شود. لیکن کاهش خرابی‌ها در این حالت با توجه به محدودیت منابع امکان‌پذیر نبوده و به‌لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه نیست. در رویکرد دوم با در نظرگرفتن اقدامات اصلاحی تابع توزیع خرابی به (۲/۱۹ و ۲۳/۵ + ۸۴) Weibull تغییر می‌پذیرد. در این شرایط مطابق شکل ۷ تعمیرات پیشگیرانه‌ی چهارهفته‌یی ازکم‌ترین سطح هزینه در مقایسه با سایرگزینه‌ها برخوردار است. وقوع خرابی‌ها نیز همچنان که در داخل مربع مربوطه نشان داده شده است تا سطح صفر کاهش می‌یابد، که در مقایسه با سایر موارد نشان‌گر بهترین نتیجه است.

جدول ۶. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی رایانه‌یی.

	سیاست تعمیر و نگه‌داری	مجموع هزینه (هزار یال)	تعداد خرابی
رویکرد اول، قبل از اقدامات اصلاحی	تعمیرات پس از خرابی	۵۸۷۷۲	۴۶
	تعمیرات پیشگیرانه پنج‌هفته‌یی	۵۵۷۳۱	۴۳
	تعمیرات پیشگیرانه چهارهفته‌یی	۵۳۴۲۸	۴۰
	تعمیرات پیشگیرانه سه‌هفته‌یی	۴۹۳۷۱	۳۵
	تعمیرات پیشگیرانه دوهفته‌یی	۴۳۷۸۲	۲۶
	تعمیرات پیشگیرانه یک‌هفته‌یی	۴۲۷۹۴	۱۲
رویکرد دوم، پس از اقدامات اصلاحی	تعمیرات پس از خرابی	۲۵۹۹۳	۲۰
	تعمیرات پیشگیرانه پنج‌هفته‌یی	۱۶۵۳۹	۱۱
	تعمیرات پیشگیرانه چهارهفته‌یی	۶۳۰۵	۰
	تعمیرات پیشگیرانه سه‌هفته‌یی	۱۱۲۷۱	۰
	تعمیرات پیشگیرانه دوهفته‌یی	۱۵۱۳۰	۰
	تعمیرات پیشگیرانه یک هفته‌یی	۳۰۵۴۲	۰



شکل ۶. مقایسه‌ی گزینه‌های تعمیرات پیشگیرانه قبل از اقدامات اصلاحی.



شکل ۷. مقایسه‌ی گزینه‌های تعمیرات پیشگیرانه بعد از اقدامات اصلاحی.

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر ابتدا با حذف ریشه‌یی خرابی‌ها با استفاده از نمودار علت و معلول، وقوع خرابی‌ها در پمپ تزریق مواد ضدخوردگی تا حد قابل توجهی کاهش یافت. سپس با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌یی و تحلیل هزینه‌ها، با تعیین بازه زمانی مناسب برای انجام تعمیرات پیشگیرانه علاوه بر کاهش تعداد خرابی‌ها به سطح صفر، مجموع هزینه‌های تعمیراتی نیز با کاهشی قابل توجه در کم‌ترین سطح قرار گرفت.

با در نظرگرفتن کاهش تعداد خرابی‌ها به‌عنوان هدف اصلی در فرایند نگه‌داری و تعمیرات و میزان هزینه‌ها به‌عنوان منابع صرف‌شده در راستای تحقق این هدف، کاهش همزمان تعداد خرابی‌ها و هزینه‌های صرف شده به‌معنای افزایش همزمان اثربخشی و کارایی است که حاصل تعامل موفقیت‌آمیز تحلیل ریشه‌یی خرابی‌ها و تعمیرات پیشگیرانه در مدل پیشنهادی است. این در حالی است که مطابق با ادبیات موضوع دست‌یابی به این مهم در رویکرد سنتی امکان‌پذیر نیست.

از این‌رو نوآوری مطالعه‌ی حاضر از سه جنبه ــ که براساس بررسی‌های صورت گرفته توسط نگارندگان در منابع دیگر مشاهده نشده ــ قابل بحث است: ۱. ارائه‌ی مدل اجرایی از RCM با تأکید بر مفاهیم زیربنایی در پاسخ به محدودیت‌های حاکم بر صنایع کشورمان؛ ۲. تلفیق و یکپارچه‌سازی هدف‌مند شیوه‌های مختلف نگه‌داری و تعمیرات در کنار یکدیگر؛ ۳. تأکید بر افزایش همزمان اثربخشی و کارایی در فرایند نگه‌داری و تعمیرات.

نکته‌ی قابل توجه دیگر، مصداق قانون پارتو در این پژوهش است.[۱۶] براساس ارزیابی ریسک‌های خرابی مطابق جدول ۲، سه دستگاه پمپ تزریق، تابلو کنترل و سیستم اندازه‌گیری در مجموع با ۳۹۲ مورد از مجموع ۴۹۸ مورد خرابی، در حدود ۸۰٪ از خرابی‌ها را تشکیل می‌دهند. این بدان معناست که با سرمایه‌گذاری بر روی این سه دستگاه می‌توان در حدود ۸۰٪ از مشکلات موجود در سیستم را تحت تأثیر قرار داد. این امر نشان‌گر کاربرد قانون پارتو در این مطالعه است. براین اساس دو دستگاه بعدی به‌عنوان گزینه‌های پیشنهادی در این پژوهش برای انجام مطالعات آتی معرفی می‌شوند.

در نهایت لازم به ذکر است که کاهش تعداد خرابی‌ها در یک بازه زمانی معین اگرچه در این پژوهش برآورد قابل قبولی را به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری اثربخشی در فرایند نگه‌داری و تعمیرات ارائه می‌کند، عموماً از قابلیت مطلوب برخوردار نیست و انتقاداتی به آن وارد است: اولاً تعداد خرابی‌ها به‌تنهایی و به‌طور خام، معیار مطمئنی برای تصمیم‌گیری نیست و لازم است عواملی نظیر عمر دستگاه، شرایط عملیاتی و نوع کاربرد نیز در کنار آن ارزیابی شود. ثانیاً مطالعه‌ی این شاخص، معیار روشنی برای تصمیم‌گیری و مقایسه‌ی وضعیت فعلی با شرایط آرمانی ارائه نمی‌کند. مثلا چنانچه تعداد خرابی‌ها برای یک دستگاه ۲۰ مورد گزارش شود، تصمیم‌گیری در این خصوص که «آیا اساساً وضعیت فعلی قابل قبول است؟ این شاخص چقدر باید باشد؟ و انجام اقدامات اصلاحی با توجه به محدودیت منابع چقدر ضرورت دارد؟» ممکن است برای سازمان مشکل‌ساز شود. از این‌رو توسعه‌ی شاخص مناسب برای سنجش اثربخشی در فرایند نگه‌داری و تعمیرات از مباحث جذاب در این حوزه محسوب می‌شود که به تحقیقات آتی واگذار می‌شود.

پانوشت‌ها

1. reliability center maintenance
2. cause and effect
3. failure modes and effects analysis
4. risk priority number
5. ذکر شده در ادبیات تحقیق
6. national aeronautics and space administration
7. occurrence
8. severity
9. detection
10. root cause analysis
11. Kaoru Ishikawa
12. Monte Carlo

منابع (References)

1. Gabbar, H.A., et al. "Computer-aided RCM-based plant maintenance management system", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, **19**, pp. 449-458 (2003).
2. Haj-Shirmohammadi, A.,"Maintenance planning", Esfahan, Ghazal Publishing Press, (In Persian) (2001).
3. Seyed-Hosseini,S.M.,"Systematic planning,of maintenance in industry and service", Tehran, Industrial Management Organization press, (In Persian)(1998).
4. Wang, H. "A survey of maintenance policies of deteriorating systems", *European Journal of Operational Research*, **139**, pp. 469-489 (2002).
5. Carretero, J., et al. "Applying RCM in large scale systems: A case study with railway networks", *Reliability Engineering and System Safety*, **82**, pp. 257-273 (2003).
6. Vassilakis, E. and Besseris, G. "An application of TQM tools at a maintenance division of a large aerospace company", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, **15**(1), pp. 31-46 (2009).
7. Arunraj, N.S. and Maiti, J. "Risk-based maintenance-techniques and applications", *Journal of Hazardous Materials*, **142**, pp. 653-661 (2007).
8. Korayem, M.H. and Iravani, A. "Improvement of 3P and 6R mechanical robots reliability and quality applying FMEA and QFD approaches", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **24**, pp. 472-487 (2008).

9. Chin, K.S., et al. "Failuremode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach", *Computers & Operations Research,* **36**, pp. 1768-1779 (2009).
10. Rhee, S.J. and Ishii, K., "Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability", *Advanced Engineering Informatics,* **17**, pp. 179-188 (2003).
11. Clavareau, J. and Labeau, P.E. "Maintenance and replacement policies under technological obsolescence", *Reliability Engineering and System Safety,* **94**, pp. 370-381 (2009).
12. Cadini, F.; Zio, E. and Avram, D. "Model-based Monte Carlo state estimation for condition-based component replacement", *Reliability Engineering and System Safety,* **94**, pp. 752-758 (2009).
13. Deshpande, V.S. and Modak, J.P. "Maintenance strategy for tilting table of rolling mill based on reliability considerations", *Reliability Engineering and System Safety,* **80**, pp. 1-18 (2003).
14. Hu, A.H., et al. "Risk evaluation of green, components to hazardous substance using FMEA and FAHP", *Expert Systems with Applications,* (In press) (2008).
15. Carmignani, G. "An integrated structural framework to cost-based FMECA: The priority-cost FMECA", *Reliability Engineering and System Safety,* (In press) (2008).
16. Ishikawa,K., "Guid to quality control" ,Translated by Zaremehrjerdi,Y.,Mashad, Imam Reza University press, (In Persian) (1996).
17. Rao, K.D., et al., "Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment", *Reliability Engineering and System Safety,* (In press) (2008).
18. Marquez, A.C., et al., "Monte Carlo-based assessment of system availability: A case study for cogeneration plants", *Reliability Engineering and System Safety,* **88**, pp. 273-289 (2005).
19. Banks,J.and Carson,J.,"Discrete-Event system simulation", Translated by: Mahlooji, H., Tehran, Sharif University of Technology press,(In Persian)(1998).
20. Cadini, F.; Zio, E. and Avram D. "Monte Carlo-based filtering for fatigue crack growth estimation", *Probabilistic Engineering Mechanics,* (In press), (2008).
21. Hines,W.and Montgomery,D.,"Probability and statistics in engineering and management science", Translated by Owlia, M.S., Yazd, Yazd University press,(In Persian)(1386).
22. Das, K. "A comparative study of exponential distribution vs Weibull distribution in machine reliability analysis in a CMS design", *Computers & Industrial Engineering,* **54**, pp. 12-13 (2008).
23. Tasi, Y.T.; Wang, K.S. and Tasi, L.C. "A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems", *Reliability Engineering and System Safety,* **84**, pp. 261-270 (2004).
24. Chan, F.T.S., et al. "Solving distributed FMS scheduling problems subject to maintenance: Genetic algorithms approach", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,* **22**, pp. 493-504 (2006).
25. Dutuit, Y. and Rauzy, A. "Approximate estimation of system reliability via fault trees", *Reliability Engineering and System Safety,* **87**, pp. 163-172 (2005).