



DOI: 10.22084/IER.2023.27913.2130

بررسی تأثیر مکانیزم‌های مختلف خرابی فرآیندهای تولیدی در مدل‌های یکپارچه نگهداری و تعمیرات و کنترل فرآیند آماری با استفاده از طراحی آزمایشات

حسن رسائی^{۱*}، هیوا فاروقی^۲

۱. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

خلاصه

با افزایش اتوماسیون، فرآیندهای تولید از کارگران به سمت ماشین‌آلات، تغییر جهت دادند؛ بنابراین نقش وضعیت ماشین‌آلات در کنترل کیفیت، کمیت و هزینه‌ها، بیش از پیش اهمیت یافت. برای موفقیت در این محیط جدید، تجهیزات باید در شرایط ایده‌آل نگهداری شوند تا بتوانند پاسخ‌گوی چالش‌های کیفیتی امروزه باشند. محققان زیادی بر اهمیت و برنامه‌ریزی توأم نت و کنترل فرآیند آماری صحت گذاشته‌اند و در این راستا مدل‌های یکپارچه مختلفی توسعه داده شده است. در این تحقیق یک فرآیند تولید ساده مورد بررسی قرار گرفته است که شامل دو حالت عملیاتی مختلف است: حالت تحت کنترل و حالت خارج از کنترل. برای این سیستم، مدل یکپارچه نت-SPC، مدل جداگانه نت، مدل جداگانه SPC به دست می‌آید. براین اساس، عملکرد سیستم در حالت هماهنگی تصمیمات مربوط به نت و SPC باحالی که هماهنگی بین تصمیمات نت و SPC وجود نداشته باشد مورد مقایسه قرار می‌گیرد. براساس تکنیک آزمایش‌های عاملی، عملکرد مدل یکپارچه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل ارائه شده تحت ۵ مکانیزم خرابی بررسی شده است که شامل: ۱- توزیع وایبل ۲- توزیع نرمال ۳- توزیع رایلی ۴- توزیع گاما و ۵- توزیع نمایی می‌باشد. اگرچه میزان صرفه‌جویی در حالت‌های توزیع نرمال، گاما، وایبل و رایلی تقریباً یکسان و در حدود ۶٪ می‌باشد اما در حالتی که مکانیزم خرابی فرآیند براساس توزیع نمایی باشد، هماهنگ‌سازی تصمیمات نت و SPC می‌تواند منجر به کاهش بیشتری در هزینه‌های عملیاتی شود. میزان کاهش در هزینه‌های سیستم در حالت توزیع نمایی به‌طور متوسط ۱۴/۵٪ مشاهده شد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۱/۱۱/۸

پذیرش ۱۴۰۲/۲/۱

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

نگهداری و تعمیرات

کنترل فرآیند آماری

مکانیزم خرابی فرآیند

مدلهای یکپارچه

طراحی آزمایشات

۱. مقدمه

به‌طور کلی فرآیندهای اصلی یک سیستم تولیدی که بیشترین تأثیر را بر کارایی کلی عملیات دارند عبارتند از: ۱- برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی ۲- کنترل کیفیت و ۳- برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات (نت) (۲، ۱). علی‌رغم اینکه تعامل و تأثیرگذاری این سه فرآیند بر همدیگر تا حدودی واضح و مبرهن است اما مدل‌ها و رویکردهای علمی زیادی وجود ندارد که به‌طور همزمان، بهینه‌سازی این سه فرآیند و ارتباط

آن‌ها را مورد بررسی قرار داده باشد.

کیفیت یک استراتژی مهم در دنیای رقابتی امروز است. یک برنامه بهبود کیفیت مؤثر برای موفقیت و رشد یک سازمان، حیاتی است. از طرف دیگر تغییر سریع در بازار و افزایش تنوع محصولات، منجر به افزایش اتوماسیون و نیاز به تجهیزات پیچیده‌تر شد [۳]. با افزایش اتوماسیون، فرآیندهای تولید از کارگران به سمت ماشین‌آلات، تغییر جهت دادند؛ بنابراین نقش وضعیت ماشین‌آلات در کنترل کیفیت،

* نویسنده مسئول: حسن رسائی

تلفن: ۰۲۱-۷۳۲۲۵۰۰۴؛ پست الکترونیکی: H.Rasay@Kut.ac.ir

توسعه داده شده در زمینه SPC و نت معمولاً هدف از نت دو مورد ذکر می‌شود؛ از یک طرف نت منجر به حذف هزینه‌های کیفیتی می‌شود که در نتیجه عملکرد فرآیند در حالت خارج از کنترل ایجاد می‌گردد که معمولاً هدف SPC نیز است. از طرف دیگر، نت منجر به بهبود قابلیت اطمینان و حداقل‌سازی احتمال خرابی می‌شود (زیرا یک وضعیت بهتر با احتمال کمتری دچار خرابی می‌شود) که این هدف اولیه نت است [۳].

تاگارس [۶] بیان می‌کند که اطلاعات به دست آمده در فرآیند SPC، نوع فعالیت اصلاحی را مشخص می‌کند و بنابراین می‌تواند بر برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه تأثیرگذار باشد. به همین صورت، فعالیت‌های نت بر الگوی زوال فرآیندها تأثیر گذاشته و بنابراین الزامات کنترل فرآیند را تغییر می‌دهند. در برخی از مدل‌های یکپارچه برای نت و SPC، بازرسی کیفیت محصول را معادل بازرسی ماشین دانسته‌اند در واقع با بازرسی محصول می‌توان به طور غیرمستقیم از وضعیت سیستمی که آن محصول را تولید می‌کند مطلع شد [۵].

یوانگ و همکاران [۹] رابطه بین کیفیت و نت را به این صورت بیان می‌کنند. نگهداری و تعمیرات چه به صورت نت پیشگیرانه و چه نت اصلاحی، دارای تأثیر مستقیم بر روی قابلیت اطمینان تجهیزات است و بنابراین بر کارایی تجهیزات تأثیرگذار است. با این فرض که این تجهیزات برای تولید نوع خاصی از محصول به کار برده می‌شوند با بهبود کارایی تجهیزات، کیفیت محصولات نیز بهبود می‌یابد.

به دلیل رقابت روزافزون و تأکید مشتریان بر تحویل به موقع محصول با کیفیت مناسب و ضرورت حصول نرخ بازگشت سرمایه در دوره مورد نظر، عملکرد تجهیزات و ماشین‌آلات باید قابل اعتماد باشد و بتوان بدون صرف هزینه‌های قابل توجه برای توقفات و از کار افتادگی‌ها، تجهیزات را در شرایط کاری قابل اطمینانی حفظ و نگهداری کرد. نگهداری و تعمیرات یک عامل مهم در کیفیت محصول به شمار می‌رود و می‌تواند به عنوان یک استراتژی برای موفقیت در رقابت به کار گرفته شود. بی‌ثباتی عملکرد ماشین‌آلات و تجهیزات منجر به افزایش نوسان در محصول گردیده و می‌تواند شرایط را برای تولید محصول معیوب مساعد سازد. برای دستیابی به سطح بالایی از کیفیت، تجهیزات تولیدی باید در شرایط مشخصی کار کنند و این وضعیت از طریق فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات مناسب قابل تأمین است.

۲. مرور ادبیات

در این قسمت برخی از مدل‌های یکپارچه نت و کنترل فرآیند آماری را که به تحقیق حاضر نزدیک است مرور کرده و به اختصار در مورد آن‌ها توضیح می‌دهیم. لینیدرمن و همکاران [۱۰] یک سیستم تولیدی را مورد بررسی قرار داده‌اند که شامل یک فرآیند تک‌مرحله‌ای است. فرض شده است که خرابی فرآیند در این مدل از توزیع وایبل پیروی

کمیت و هزینه‌ها، بیش از پیش اهمیت یافت. برای موفقیت در این محیط جدید، تجهیزات باید در شرایط ایده‌آل نگهداری شوند تا بتوانند پاسخ‌گوی چالش‌های کیفیتی امروزه باشند [۴]. در حالی که نت زیاد، منجر به هزینه‌های مازاد می‌شود؛ نت ناکافی نیز منجر به تولید محصولات معیوب و در نتیجه افزایش هزینه‌های مربوط به ضایعات و محصولات معیوب می‌شود؛ بنابراین در نظر گرفتن توأم مسأله کنترل کیفیت فرآیند و برنامه‌ریزی نت، منتج به عملکرد بهتری می‌شود.

افزایش رابطه بین کنترل کیفیت و برنامه‌ریزی نت، سازمان‌ها را بر آن داشته که به توسعه سیستم‌های یکپارچه روی بیاورند که نیازمند یک سطح بالا از هماهنگی بین فعالیت‌های مدیریتی است [۳]. برای رسیدن به سطح مطلوبی از کیفیت، کاهش پیوسته در واریانس فرآیند مورد نیاز است. نمودارهای کنترل به عنوان یکی از ابزارهای اصلی کنترل فرآیند آماری، با شناسایی و حذف منابع تغییرپذیری، به طور گسترده‌ای به منظور کنترل و کاهش واریانس فرآیندها مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از منابع تغییرپذیری که می‌تواند در نهایت بر کیفیت محصول اثر گذاشته و منجر به افزایش واریانس فرآیند شود کمبود فعالیت‌های نت روی تجهیزات است. از آنجاکه کاهش در عملکرد تجهیزات، منجر به کاهش کیفیت محصول می‌شود؛ یک برنامه نت مناسب می‌تواند منجر به کاهش واریانس فرآیند و افزایش کیفیت محصول شود. ارتباط نزدیک بین کیفیت و نت، محققان را بر آن داشته تا مدل‌های یکپارچه‌ای را توسعه دهند که معمولاً در عمل بسیار مؤثر بوده‌اند. این مدل‌ها با انگیزه کاهش در هزینه‌های کلی کیفیت ارائه شده‌اند [۵].

محققان زیادی بر اهمیت و برنامه‌ریزی توأم نت و کنترل فرآیند آماری صحنه گذاشته‌اند. مدل ارائه شده توسط تاگارس^۱ [۶] را می‌توان نخستین مدلی دانست که طراحی اقتصادی نمودار کنترل و برنامه‌ریزی سیستم نت را توأم با هم مورد بررسی قرارداد. ژو و ژو^۲ [۷] بیان می‌کند که برای کنترل فرآیندهای تولید دو ابزار اصلی وجود دارد: کنترل فرآیند آماری و مدیریت نت. این دو رویکرد (هم در عرصه آکادمیک و هم در عرصه عمل) معمولاً به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ اما اشتراکات زیادی بین اهداف هر دو رویکرد وجود دارد. اهداف مشترک هر دو رویکرد شامل رسیدن به کیفیت بهینه محصول، کاهش زمان‌های خرابی و توقفات و کاهش هزینه‌ها با کنترل واریانس فرآیند است. با این وجود، اجرا و به کارگیری این دو روش به صورت جداگانه و موازی با هم یا کاربرد هر کدام از آن‌ها به تنهایی، به طور کامل مؤثر نیست. چه در محیط آکادمیک و دانشگاهی و چه در عرصه عمل، این امر مشخص شده است که ارتباط قوی بین کیفیت محصول، کیفیت فرآیند و نگهداری و تعمیرات تجهیزات وجود دارد و ادغام این ابزارها می‌تواند بسیار مفید و مؤثر باشد.

کیو^۳ [۸] بیان می‌کند که زوال^۴ یک ماشین تولیدی از مهم‌ترین عوامل تولید محصول معیوب به حساب می‌آید. در مدل‌های یکپارچه

3. Kuo

4. Deterioration

1. Tagaras

2. Zhou and Zhu

حالت خارج از کنترل وارد شود. علاوه بر این، صرف‌نظر از اینکه سیستم در کدام حالت عملیاتی قرار دارد ممکن است به‌طور ناگهانی دچار خرابی شود که در این صورت لازم است عملیات نت تصحیحی انجام گیرد. دو نوع تعمیرات در مقاله مورد بررسی قرار گرفته است: تعمیرات پیشگیرانه (PM) و تعمیرات اصلاحی^۵ (CM). هر دو نوع تعمیرات فرض می‌شود که فرآیند را به‌طور کامل تجدید می‌کنند. PM در دو حالت صورت می‌گیرد: (۱) اگر فرآیند تا انتهای یک دوره مشخص مثل t_m در حالت تحت کنترل به فعالیت خود ادامه دهد و یا اگر فرآیند در دوره‌های پیش به حالت خارج از کنترل وارد شده و نمودار کنترل آن را تشخیص نداده باشد (۲) در حالتی که نمودار کنترل یک سیگنال درست مبنی بر خارج از کنترل بودن فرآیند ارسال کند. پس از ارائه مدل یکپارچه، تحلیل‌های عمیق عددی براساس طراحی آزمایشات در مورد تأثیر پارامترهای مدل انجام گرفته است. در مرجع [۲] برای پیش فرآیند تولید و توسعه مدل یکپارچه نت و کنترل کیفیت از نمودار کندل بیزین وصفی استفاده شده است. فرآیند موردنظر شامل دو حالت عملیاتی (حالت تحت کنترل و حالت خارج از کنترل) و یک حالت خرابی کامل می‌باشد.

لیو و همکاران [۱۳] یک سیستم سری را مورد بررسی قرار داده‌اند که متشکل از دو عضو یکسان می‌باشد و هر عنصر سیستم می‌تواند در ۳ حالت قرار داشته باشد. نویسندگان به ارائه مدلی پرداخته‌اند که متغیرهای نمودار کنترل را طوری تنظیم می‌کند تا هزینه‌های سیستم حداقل شود. زمان‌های لازم برای انتقال سیستم از یک وضعیت به وضعیت دیگر به‌صورت نمایی در نظر گرفته شده است.

مدل یکپارچه دومی که به بررسی ادغام نت و طراحی نمودار کنترل در یک سیستم متشکل از بیش از یک جزء پرداخته، مدل ژانگ و مای [۱۴] است. در این مدل فرض می‌شود که فرآیند مورد بررسی، شامل دو مرحله وابسته به هم است. هر کدام از مراحل فرآیند می‌توانند بنابر یک توزیع نمایی از حالت کنترل خارج شوند. برای کنترل مرحله اول فرآیند از نمودار کنترل شوهارت انفرادی^۶ و در مورد مرحله دوم از نمودار کنترل باقیمانده^۷ استفاده می‌شود.

مرجع [۱۵] یک مدل یکپارچه برای سیستم تولید دومرحله‌ای وابسته توسعه داده و عملکرد این مدل با مدل‌های جداگانه نت مورد مقایسه قرار گرفته است. مرجع [۱۶] به توسعه یک مدل یکپارچه نت و کنترل فرآیند آماری پرداخته است در حالی که فرض شده است خرابی فرآیند براساس یک فرآیند تصادفی هندسی رخ می‌دهد و بعد از تعدادی محدود عملیات نت جزئی سیستم باید تحت تعمیرات کلی قرار گیرد. هادیان و همکاران [۱۷] یک مدل یکپارچه نت، کنترل کیفیت و کنترل موجودی برای یک سیستم تولید ناب ارائه داده‌اند در حالی که به‌جهت مواجهه با خرابی‌های احتمالی و جلوگیری از کمبود در زمانی که ماشین‌آلات تولیدی تحت عملیات نت قرار می‌گیرند ذخیره

می‌کند. در هر لحظه از زمان، فرآیند می‌تواند در یکی از دو حالت تحت کنترل و یا خارج از کنترل قرار داشته باشد. در این مدل فرض شده است که در صورت ارسال یک سیگنال درست از نمودار کنترل، عملیات نت واکنشی^۱ روی فرآیند اعمال می‌شود. در صورت ارسال سیگنال اشتباه از نمودار، فرآیند به فعالیت خود ادامه می‌دهد. همچنین اگر تا انتهای سیکل عملیاتی، فرآیند تحت کنترل باقی بماند عملیات نت برنامه‌ریزی شده^۲ روی سیستم اعمال می‌شود. در این مدل، پارامترهای نمودار کنترل و فواصل انجام نت برنامه‌ریزی شده، طوری تعیین می‌شود که ارزش انتظاری هزینه در واحد زمان حداقل شود. علاوه بر ارائه مدل یکپارچه، مدل‌های جداگانه‌ای برای نت و کنترل فرآیند آماری ارائه شده و عملکرد مدل یکپارچه نسبت به آن‌ها ارزیابی شده است. همچنین در این مقاله از تکنیک طراحی آزمایشات عاملی برای تحلیل حساسیت و بررسی تأثیر پارامترهای سیستم بر مدل یکپارچه و متغیرهای تصمیم استفاده شده است.

ژو و ژو [۱۷] مدلی مشابه با مدل لیندرمن و همکاران ارائه داده‌اند با این تفاوت که فرض شده است در صورت ارسال سیگنال اشتباه از نمودار کنترل، عملیات نت جبرانی^۳ روی سیستم اجرا شده و فرآیند تجدید می‌شود. فرض می‌شود که فرآیند پس از طی h ساعت از تولید، توسط نمودار کنترل مورد بازرسی قرار می‌گیرد تا مشخص شود که آیا فرآیند در حالت تحت کنترل و یا خارج از کنترل به‌سر می‌برد. مشخصه کیفی اندازه‌گیری شده و بر روی یک نمودار کنترل مناسب ترسیم می‌شود. اگر نمودار کنترل یک سیگنال خارج از کنترل را پس از k امین دوره بازرسی ارسال نکرد آنگاه در دوره $k+1$ نت برنامه‌ریزی شده به اجرا گذاشته می‌شود. یا این وجود اگر در هر کدام از دوره‌های بازرسی، نمودار حالت خارج از کنترل را نشان بدهد آنگاه فرآیند بازرسی برای تأیید این سیگنال آغاز می‌گردد. اگر این سیگنال به‌درستی خارج از کنترل بودن فرآیند را نشان داده باشد آنگاه نت واکنشی به اجرا گذاشته می‌شود و اگر نتیجه بازرسی نشانگر این واقعیت باشد که سیگنال ارسالی اشتباه بوده است آنگاه نت جبرانی روی سیستم اعمال می‌شود. همچنین فرض می‌شود که اجرای هر کدام از فعالیت‌های نت، سیستم را به یک سیستم "نو مثل اول"^۴ تبدیل می‌کند. در نهایت این مدل با تعیین پارامترهای مربوط به نمودار کنترل و مقدار k (که مربوط است به عملیات نت)، سیستم را بهینه‌سازی می‌کند.

پاناگوتودیو و تاگاس [۱۲، ۱۱] سیستمی متشکل از یک مرحله را در نظر گرفته است که ممکن است در شرایط مختلف عملیاتی باشد. به‌طور مشخص دو حالت عملیاتی وجود دارد: حالتی که سیستم تحت کنترل است و حالتی که سیستم خارج از کنترل است. حالت خارج از کنترل منجر به کاهش درآمدهای و افزایش هزینه‌های کیفیتی می‌شود. فرآیند در اثر یک انحراف با دلیل ممکن است از حالت تحت کنترل به

5. Corrective maintenance
6. Shewhart individual control chart
7. Residual control chart

1. Reactive maintenance
2. lanned maintenance
3. Compensatory maintenance
4. As-good-as-new system

اطمینان موجودی در سیستم نگهداری می‌شود

۳. تعریف مسأله

فرآیند تولیدی را در نظر بگیرید که می‌تواند در یکی از دو حالت عملیاتی زیر قرار داشته باشد: حالت تحت کنترل (که آن را با حالت ۰ نشان می‌دهیم) و حالت خارج از کنترل (که آن را با حالت ۱ نشان می‌دهیم). در شروع هر سیکل عملیاتی، فرآیند در حالتی که تحت کنترل است شروع به فعالیت کرده و پس از گذشت مدت‌زمانی، به حالت خارج از کنترل شیفت پیدا می‌کند. فرض می‌شود قبل از شیفت به حالت یک، زمانی را که فرآیند در حالت صفر سپری می‌کند، یک متغیر تصادفی است که از یک توزیع کلی پیوسته با نرخ خرابی غیرنزولی پیروی می‌کند.

پایش فرآیند به این صورت اجر می‌شود: در نقاط زمانی t_1, t_2, \dots, t_{m-1} که متغیرهای تصمیم مدل هستند، نمونه‌ای به اندازه n از محصول فرآیند انتخاب شده و مشخصه (مشخصه‌های) کیفی موردنظر از محصول مورد بازرسی قرار می‌گیرد. براساس اطلاعات حاصل از این نمونه، آماره (آماره‌های) آزمون مناسب تشکیل داده و مقدار آن‌ها بر نمودار (نمودارهای) کنترل مناسب ترسیم می‌کنیم. اگر مقدار آماره در داخل حدود کنترل نمودار کنترل مورد استفاده قرار بگیرد، فرآیند تحت کنترل فرض می‌شود؛ اما اگر این آماره در خارج از حدود کنترل واقع شود در این صورت احتمالاً فرآیند در حالت خارج از کنترل به سر می‌برد و نمودار هشدار خواهد داد. برای تعیین وضعیت دقیق فرآیند پس از ارسال یک سیگنال خارج از کنترل، یک بازرسی با صرف هزینه و زمان به ترتیب Z_I و W_I به اجرا گذاشته می‌شود. فرض می‌شود این بازرسی کاملاً دقیق بوده و با احتمال یک می‌تواند حالت درست فرآیند را تعیین کند. اگر نتیجه این بازرسی نشانگر این باشد که فرآیند در حالت صفر قرار دارد (به عبارت دیگر سیگنال نمودار کنترل اشتباه بوده است) در این صورت لازم نیست هیچ‌گونه عملیات نتی صورت گیرد و فرآیند به فعالیت خود ادامه می‌دهد. اما اگر نتیجه بازرسی نشانگر این باشد که سیگنال نمودار کنترل درست بوده (به عبارت دیگر فرآیند به درستی خارج از کنترل اعلام شده است) در این صورت عملیات تعمیرات واکنشی^۱ (RM) اجر می‌شود. اگر پس از $m-1$ دوره بازرسی هیچ سیگنال درستی مبنی بر خارج از کنترل بودن فرآیند از نمودار کنترل ارسال نشود در این صورت فرآیند در زمان t_m متوقف شده و پس از بازرسی فرآیند، عملیات نت مناسب روی سیستم اعمال می‌شود. در زمان t_m اگر فرآیند در حالت صفر قرار داشته باشد عملیات نت پیشگیرانه (PM) و در صورت خارج از کنترل بودن فرآیند، عملیات RM اجرا می‌شود.

لازم به ذکر است که دو نوع بازرسی روی سیستم اعمال می‌شود. نوع اول که در واقع نمونه‌گیری از فرآیند است و در نقاط زمان t_1, t_2, \dots, t_{m-1} اجرا می‌شود. این نوع از بازرسی در تشخیص وضعیت

درست فرآیند، دارای خطاهای نوع اول و دوم است که مقدار آن با توجه به نمودار کنترل مورد استفاده متفاوت است. بازرسی نوع دوم، بازرسی است که در دو حالت به اجرا گذاشته می‌شود: ۱- پس از ارسال سیگنال خارج از کنترل از نمودار ۲- در انتهای سیکل عملیاتی یعنی در زمان t_m . از این به بعد به منظور متمایز کردن این دو نوع بازرسی از هم، بازرسی نوع اول را بازرسی نمونه‌گیری و بازرسی نوع دوم را بازرسی نت می‌نامیم.

براساس مطالبی که تاکنون ذکر شده است می‌توان گفت که هر سیکل عملیاتی در وضعیتی شروع می‌شود که فرآیند تحت کنترل قرار دارد و با انجام یکی از عملیات PM یا RM به اتمام می‌رسد. همچنین لازم به ذکر است که هر دو نوع تعمیر، کامل^۲ فرض می‌شوند یعنی فرآیند را به حالت "نو مثل اول"^۳ برمی‌گردانند. بر این اساس، در هر سیکل عملیاتی، ۳ سناریو برای تکامل فرآیند قابل تصور است. این مطلب در جدول یک نشان داده شده است.

جدول (۱). سناریوهای مختلف برای تکامل فرآیند در یک سیکل عملیاتی

سناریو	وضعیت فرآیند	آیا نمودار کنترل سیگنال درستی ارسال می‌کند؟	نوع عملیات نت
سناریو ۱	تحت کنترل	-	PM در زمان t_m
سناریو ۲	خارج از کنترل	بله	RM پس از ارسال سیگنال خارج از کنترل
سناریو ۳	خارج از کنترل	خیر	RM در زمان t_m

سناریو ۱: در این سناریو فرض می‌شود که فرآیند تا انتهای سیکل عملیاتی یعنی تا زمان t_m ، در حالت تحت کنترل به سر می‌برد. در زمان t_m فرآیند متوقف می‌شود و عملیات PM صورت می‌گیرد. سناریو ۲: در این سناریو فرض می‌شود که فرآیند در یک زمانی قبل از t_m ، از کنترل خارج می‌شود. نمودار کنترل در یکی از دوره‌های بازرسی پیش‌رو، با ارسال یک سیگنال، وضعیت خارج از کنترل را تشخیص داده و بنابراین عملیات RM اجرا می‌شود.

سناریو ۳: در این سناریو فرض می‌شود که فرآیند در یک زمانی قبل از t_m ، از کنترل خارج شده اما نمودار کنترل، به دلیل خطای نوع دوم، در هیچ کدام از دوره‌های زمانی پیش‌رو قادر به تشخیص حالت خارج از کنترل نبوده است. بنابراین در زمان t_m ، فرآیند متوقف گشته و از آنجا که فرآیند در حالت یک قرار دارد عملیات RM صورت می‌گیرد.

۴. مدل سازی

۴-۱. معرفی نمادها

به منظور استخراج مدل‌ها یک سری از نمادها استفاده می‌شود که در این قسمت به معرفی این نمادها پرداخته می‌شود.

3. As-good-as-new-state

1. Reactive maintenance
2. Perfect

سپری می‌کند در هر سیکل عملیاتی		هزینه عملیاتی سیستم در واحد زمان، هنگامی که	C_0
ارزش انتظاری تعداد دوره‌های نمونه‌گیری در هر سیکل عملیاتی	$E[QC]$	فرآیند در حالت تحت کنترل است.	
احتمال اتمام سیکل عملیاتی به دلیل انجام PM	P_{PM}	هزینه‌های نمونه‌گیری از فرآیند	W_{QC}
احتمال اتمام سیکل عملیاتی به دلیل انجام RM	P_{RM}	هزینه انجام PM	W_{PM}
کران پایین برای مقدار ARL در حالت تحت کنترل	ARL_0	هزینه انجام بازرسی نت روی سیستم	W_I
کران بالا برای مقدار ARL در حالت خارج از کنترل	ARL_1	زمان لازم برای انجام نمونه‌گیری	Z_{QC}
هزینه عملیاتی سیستم در واحد زمان، هنگامی که فرآیند در حالت خارج از کنترل است.	$C_I (C_1 \geq C_0)$	زمان لازم برای انجام PM	Z_{PM}
هزینه انجام RM	$W_{RM} (W_{RM} > W_{PM})$	زمان لازم برای انجام RM	Z_{RM}
مکمل تابع توزیع تجمعی	$\bar{F}(t) = 1 - F(t)$	زمان لازم برای انجام بازرسی نت	Z_I
نقاط زمانی انجام بازرسی نمونه‌گیری (متغیر تصمیم)	$t_i (i=1, \dots, m-1)$	تابع چگالی (p.d.f) که بیانگر مکانیزم خرابی فرآیند است.	$f(t)$
۲-۴. مدل ریاضی یکپارچه نت-SPC		تابع توزیع تجمعی (C.d.f) که بیانگر مکانیزم خرابی فرآیند است.	$F(t)$
در این بخش به استخراج مدل یکپارچه نت-SPC در ده مرحله پرداخته می‌شود.		متغیر تصادفی که نشانگر زمان رخداد انحراف با دلیل است	t
۱-۲-۴. سناریوهای مختلف برای تکامل فرآیند در یک بازه بازرسی		احتمال خطای نوع I	α
در مرحله اول لازم است سناریوهای مختلف برای تکامل فرآیند در یک بازه بازرسی و احتمال رخداد هر سناریو مشخص شود. بازه بازرسی دلخواه (t_{i-1}, t_i) را در نظر بگیرید. فرآیند در زمان t_{i-1} و دقیقاً بعد از بازرسی در این نقطه زمانی، می‌تواند در حالت صفر یا یک قرار داشته باشد. براین اساس سه سناریو برای تکامل فرآیند در این بازه بازرسی قابل تصور است. جدول (۲) این مطلب را بیان می‌کند.		احتمال خطای نوع II	β
		اندازه نمونه (متغیر تصمیم)	n
		حدود کنترل نمودار (متغیر تصمیم)	k
		حداکثر طول زمان یک سیکل عملیاتی است (متغیر تصمیم)	t_m
		حداکثر تعداد دوره‌های انجام بازرسی (متغیر تصمیم)	m
		ارزش انتظاری مدت زمانی که فرآیند در حالت صفر سپری می‌کند در هر سیکل عملیاتی	$E[T_0]$
		ارزش انتظاری مدت‌زمانی که فرآیند در حالت یک	$E[T_1]$

جدول (۲). سناریوهای مختلف برای تکامل فرآیند در بازه بازرسی (t_{i-1}, t_i) و احتمالات مربوط به آن

سناریو	شکل	احتمال رخداد	زمان خارج از کنترل	زمان تحت کنترل
a		$P(a_{t_{i-1}}) = \frac{\bar{F}(t_i)}{\bar{F}(t_{i-1})}$	0	$t_i - t_{i-1}$
b		$P(b_{t_{i-1}}) = 1$	$t_i - t_{i-1}$	0
c		$P(c_{t_{i-1}}) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{f(t) dt}{\bar{F}(t_{i-1})}$	$t_i - t$	$t - t_{i-1}$

براساس رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{t_m}^1 = P_{t_{m-1}}^1 + P_{t_{m-1}}^0 \times P(c_{t_{m-1}}) \quad (6)$$

تمام انواع نت به کار گرفته شده در فرآیند کامل هستند؛ بنابراین در شروع هر سیکل عملیاتی، فرآیند در حالت صفر است و احتمال قرارگیری فرآیند در حالت یک، صفر می‌باشد.

۴-۲-۳. ارزش انتظاری مدت زمانی که فرآیند در حالت صفر سپری

می‌کند در هر سیکل عملیاتی

فرض کنید T_0^i به صورت ارزش انتظاری مدت زمانی تعریف شود که فرآیند در بازه بازرسی (t_{i-1}, t_i) در حالت صفر سپری می‌کند. برای این اساس می‌توان $E[T_0]$ را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$E[T_0] = \sum_{i=1}^m T_0^i \quad (7)$$

درحالی که T_0^i از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_0^i = P_{t_{i-1}}^0 \left[P(a_{t_{i-1}})(t_i - t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{f(t)dt}{\bar{F}(t_{i-1})} (t - t_{i-1})dt \right]; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

استخراج رابطه فوق بدین صورت است: با در نظر گرفتن جدول (۲) می‌توان ملاحظه کرد که اگر در زمان t_{i-1} ، فرآیند در حالت صفر باشد و سناریوهای a یا c اتفاق بیافتد در این صورت فرآیند در بخشی از بازه (t_{i-1}, t_i) در حالت صفر فعالیت می‌کند. اگر سناریو a اتفاق بیافتد در این صورت فرآیند کل بازه (t_{i-1}, t_i) را در حالت صفر سپری می‌کند درحالی که اگر سناریو c رخ دهد در این صورت فرآیند $t - t_{i-1}$ واحد زمانی را در حالت صفر سپری می‌کند.

۴-۲-۴. ارزش انتظاری مدت زمانی که فرآیند در حالت یک سپری

می‌کند در هر سیکل عملیاتی

فرض کنید T_1^i به صورت ارزش انتظاری طول مدت زمانی تعریف شود که فرآیند در بازه بازرسی (t_{i-1}, t_i) در حالت یک سپری می‌کند. برای این اساس می‌توان $E[T_1]$ را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$E[T_1] = \sum_{i=1}^m T_1^i \quad (9)$$

درحالی که T_1^i از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_1^i = P_{t_{i-1}}^0 \left[\int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{f(t)dt}{\bar{F}(t_{i-1})} (t_i - t)dt \right] + P_{t_{i-1}}^1 (t_i - t_{i-1}); \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

رابطه فوق بدین صورت به دست می‌آید. فرآیند در صورت رخداد سناریوهای b و c بخشی از بازه (t_{i-1}, t_i) را در حالت خارج از کنترل سپری می‌کند. اگر فرآیند در زمان t_{i-1} در حالت صفر باشد و سناریو c اتفاق بیافتد آنگاه فرآیند مدت زمان $t_i - t$ را در حالت خارج از کنترل به سر می‌برد. همچنین اگر فرآیند در زمان t_{i-1} در حالت یک باشد و سناریو b اتفاق بیافتد آنگاه فرآیند مدت زمان $t_i - t_{i-1}$ را در حالت خارج از کنترل به سر می‌برد.

در ادامه به تشریح جزئیات این سناریوها می‌پردازیم.

سناریو a: در این حالت، فرآیند در زمان t_{i-1} در حالت صفر قرار دارد و تا زمان t_i ، در این حالت باقی می‌ماند. احتمال رخداد این سناریو برابر است با:

$$P(a_{t_{i-1}}) = P(t > t_i | X_{t_{i-1}} = 0) = P(t > t_i | t > t_{i-1}) = \frac{\bar{F}(t_i)}{\bar{F}(t_{i-1})} \quad (1)$$

در رابطه فوق باید به این نکته توجه نمود که شرط $X_{t_{i-1}} = 0$ بدین مفهوم است که تا زمان t_{i-1} انحراف با دلیل بر فرآیند تأثیر نگذاشته است.

سناریو b: در این حالت، فرآیند در زمان t_{i-1} در حالت یک قرار دارد و بنابراین تا زمان t_i ، در این حالت باقی می‌ماند. احتمال رخداد این سناریو برابر است با:

$$P(b_{t_{i-1}}) = P(X_{t_i} = 1 | X_{t_{i-1}} = 1) = 1 \quad (2)$$

سناریو c: در این حالت فرآیند در زمان t_{i-1} ، در حالت صفر قرار دارد ولی در زمان t ، $t_{i-1} < t < t_i$ ، فرآیند به حالت یک شیفت پیدا می‌کند. احتمال رخداد این سناریو برابر است با:

$$P(c_{t_{i-1}}) = P(t_{i-1} < t < t_i | X_{t_{i-1}} = 0) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{f(t)dt}{\bar{F}(t_{i-1})} \quad (3)$$

۴-۲-۲. احتمال قرارگیری فرآیند در حالت صفر یا یک دقیقاً بعد از بازرسی دوره t_i

در مرحله دوم از استخراج مدل یکپارچه، احتمال قرارگیری فرآیند در هر کدام از حالت های عملیاتی در شروع هر دوره بازرسی محاسبه می‌شود. وضعیت فرآیند دقیقاً بعد از بازرسی در نقطه زمانی t_i $(i=1, 2, \dots, m-1)$ ، می‌تواند صفر و یا یک باشد. فرض کنید $P_{t_i}^0$ بیانگر این احتمال باشد که فرآیند دقیقاً بعد از بازرسی در نقطه زمانی t_i در حالت صفر قرار داشته باشد. می‌توان براساس رابطه زیر $P_{t_i}^0$ را محاسبه کرد:

$$P_{t_i}^0 = 1 - F(t_i) = \bar{F}(t_i); \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

فرض کنید $P_{t_i}^1$ بیانگر این احتمال باشد که فرآیند دقیقاً بعد از بازرسی در نقطه زمانی t_i در حالت یک قرار داشته باشد. می‌توان براساس رابطه بازگشتی زیر $P_{t_i}^1$ را محاسبه کرد:

$$P_{t_i}^1 = \beta [P_{t_{i-1}}^1 \times P(b_{t_{i-1}}) + P_{t_{i-1}}^0 \times P(c_{t_{i-1}})] = \beta [P_{t_{i-1}}^1 + P_{t_{i-1}}^0 \times P(c_{t_{i-1}})]; \quad i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (5)$$

مجموع دو عبارت داخل کروشه این احتمال را بیان می‌کنند که فرآیند دقیقاً قبل از بازرسی دوره t_i در حالت یک باشد. از طرف دیگر، اگر فرآیند قبل از زمان t_i در حالت یک قرار داشته باشد، با احتمال β ، نمودار کنترل قادر به تشخیص حالت خارج از کنترل فرآیند نیست و بنابراین فرآیند پس از بازرسی در نقطه زمانی t_i ، به فعالیت خود در حالت یک ادامه می‌دهد.

در آخرین دوره بازرسی، نمونه‌گیری نخواهیم داشت بنابراین $P_{t_m}^1$

$$E[\alpha] = \sum_{i=1}^{m-1} P_{\alpha}^i \quad (17)$$

در حالی که P_{α}^i براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{\alpha}^i = \alpha \times \bar{F}(t_i); i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (18)$$

۴-۲-۹. ارزش انتظاری هزینه در واحد زمان (ECT)

سیستمی را که در قسمت ۳ تشریح شد می‌توان به صورت یک فرآیند تجدید پاداش که شامل سیکل‌های تصادفی و یکسان مستقل است در نظر گرفت؛ بنابراین ارزش انتظاری هزینه عملیاتی فرآیند در واحد زمان (ECT) را می‌توان به صورت نسبت ارزش انتظاری هزینه در یک سیکل عملیات ($E[C]$)، به ارزش انتظاری طول زمان یک سیکل عملیاتی ($E[T]$)، به دست آورد.

اگر $m > 1$ باشد، می‌توان $E[C]$ و $E[T]$ را از رابطه‌های زیر محاسبه کرد:

$$E[C] = C_0 E[T_0] + C_1 E[T_1] + W_{QC} E[QC] + W_I E[\alpha] + W_I (P_{t_{m-1}}^0 + P_{t_{m-1}}^1) + W_{PM} P_{PM} + W_{RM} P_{RM} \quad (19)$$

$$E[T] = E[T_0] + E[T_1] + Z_I E[\alpha] + Z_I (P_{t_{m-1}}^0 + P_{t_{m-1}}^1) + Z_{PM} P_{PM} + Z_{RM} P_{RM} \quad (20)$$

در معادله (۱۹) جمله اول ارزش انتظاری هزینه‌های سیستم را در حالت تحت کنترل محاسبه می‌کند. جمله دوم ارزش انتظاری هزینه‌های سیستم را در حالت خارج از کنترل محاسبه می‌کند. عبارت سوم رابطه (۱۹) مربوط به هزینه‌های انجام نمونه‌گیری است. جملات چهارم و پنجم در رابطه فوق هزینه‌های انجام بازرسی نت را محاسبه می‌کنند و سرانجام عبارات شش و هفت به محاسبه هزینه‌های نت مربوط است. در رابطه (۲۰) عبارت اول و دوم به ترتیب ارزش انتظاری زمانی را که فرآیند در حالت‌های تحت کنترل و خارج از کنترل سپری می‌کند محاسبه می‌کند. جمله سوم زمان‌های صرف شده به منظور بررسی سیگنال‌های اشتباه را به دست می‌آورد. جمله چهارم مربوط است به زمان صرف شده به منظور بازرسی نت که در انتهای سیکل تولید انجام می‌گیرد. سرانجام عبارات پنج و شش زمان‌های انجام نت پیشگیرانه و نت واکنشی را به دست می‌دهند.

برای حالت خاص $m=1$ هیچ‌گونه نمونه‌گیری نخواهیم داشت و فرآیند پس از طی مدت زمانی متوقف شده و پس از بازرسی نت، عملیات نت مناسب روی آن صورت می‌گیرد. در این حالت روابط مربوط به $E[C]$ و $E[T]$ به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$E[C] = C_0 E[T_0] + C_1 E[T_1] + W_{PM} P_{PM} + W_{RM} P_{RM} + W_I \quad (21)$$

$$E[T] = E[T_0] + E[T_1] + Z_{PM} P_{PM} + Z_{RM} P_{RM} + Z_I \quad (22)$$

۴-۲-۱۰. مدل یکپارچه نت-SPC

در نهایت، مدل یکپارچه نت-SPC را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

$$\text{Minimize ETC}(t_1, \dots, t_{m-1}, t_m, m, k, n) = \frac{E[C]}{E[T]}$$

۴-۲-۵. احتمال اتمام سیکل تولید به دلیل RM

اگر P_{RM}^i به صورت احتمال انجام RM پس از بازرسی در نقطه زمانی t_i تعریف شود آنگاه P_{RM} توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$P_{RM} = \sum_{i=1}^m P_{RM}^i \quad (11)$$

در حالی که P_{RM}^i به ازاء $(i=1, 2, \dots, m-1)$ ، توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_{RM}^i = (1 - \beta) \left[P_{t_{i-1}}^1 + P_{t_{i-1}}^0 \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{f(t) dt}{\bar{F}(t_{i-1})} \right]; \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (12)$$

مجموع دو عبارت داخل کروشه بیانگر این احتمال هستند که فرآیند دقیقاً قبل از بازرسی دوره t_i در حالت یک باشد. از طرف دیگر اگر فرآیند قبل از بازرسی t_i در حالت یک باشد در این صورت با احتمال $1 - \beta$ نمودار کنترل، حالت خارج از کنترل را تشخیص داده و پس از ارسال یک سیگنال از نمودار کنترل، عملیات RM انجام می‌شود. از آنجا که در نقطه زمانی t_m ، نمونه‌گیری نداریم و فقط بازرسی نت اجرا می‌شود بنابراین P_{RM}^m از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_{RM}^m = P_{t_{m-1}}^1 + P_{t_{m-1}}^0 \int_{t_{m-1}}^{t_m} \frac{f(t) dt}{\bar{F}(t_{i-1})} \quad (13)$$

۴-۲-۶. احتمال اتمام سیکل به دلیل PM

براساس فرضیات عنوان شده در مورد فرآیند، یک سیکل عملیاتی به دلیل انجام RM و یا PM به اتمام می‌رسد. احتمال اتمام سیکل عملیاتی به دلیل انجام RM محاسبه شد؛ بنابراین احتمال اتمام سیکل عملیاتی به دلیل انجام PM برابر است با:

$$P_{PM} = 1 - P_{RM} \quad (14)$$

۴-۲-۷. ارزش انتظاری تعداد بازرسی‌های نمونه‌گیری در هر سیکل عملیاتی

اگر P_{QC}^i به صورت احتمال انجام بازرسی نمونه‌گیری در انتهای بازه زمانی (t_{i-1}, t_i) تعریف شود؛ آنگاه $E[QC]$ توسط رابطه زیر قابل تبیین است:

$$E[QC] = \sum_{i=1}^{m-1} P_{QC}^i \quad (15)$$

در حالی که P_{QC}^i توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{QC}^i = P_{t_{i-1}}^0 + P_{t_{i-1}}^1; \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (16)$$

توجه داشته باشید که مجموع دو عبارت طرف راست معادله فوق لزوماً برابر یک نیست زیرا یک سیکل عملیاتی ممکن است قبل از رسیدن به نقطه زمانی t_i ، بدلیل انجام RM به اتمام برسد.

۴-۲-۸. ارزش انتظاری تعداد سیگنال‌های اشتباه در یک سیکل عملیاتی

اگر احتمال اینکه فرآیند در نقطه زمانی t_i ($i = 1, 2, \dots, m-1$) یک سیگنال اشتباه ارسال کند را با P_{α}^i نشان دهیم آنگاه $E[\alpha]$ از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

همچنین فرض می‌شود که مکانیزم خرابی فرآیند از یک توزیع وایبل به فرم زیر پیروی می‌کند:

$$f(t) = v\lambda^v t^{v-1} \exp\{-(\lambda t)^v\}; \lambda, \theta, t \geq 0 \quad (24)$$

در این رابطه v پارامتر شکل و λ پارامتر مقیاس است برای فرآیند موردنظر، مقدار پارامتر شکل (۲) و پارامتر مقیاس طوری است که میانگین توزیع وایبل، μ ، برابر با ۲۰ ساعت باشد. سایر پارامترهای مربوط به این فرآیند در جدول (۳) نشان داده شده است. در این جدول C_f و C_v هزینه‌های به ترتیب ثابت و متغیر نمونه‌گیری است؛ بنابراین هزینه نمونه‌گیری برای نمونه‌ای به اندازه n برابر است با $C_f + nC_v$.

جدول (۳). پارامترهای مثال

پارامتر	δ	C_f	C_v	W_I	C_0	C_1	W_{RM}	W_{PM}
مقدار	۱	۱۰	۰/۱	۱۰۰	۱۰	۲۰۰	۳۰۰۰	۲۰۰۰
پارامتر	Z_I	Z_{RM}	Z_{PM}					
مقدار	۰/۳	۱	۰/۸					

نتیجه بهینه‌سازی مدل یکپارچه نت-SPC، مدل جداگانه نت، مدل جداگانه SPC و مدل ناهماهنگ در جدول (۴) ارائه شده است. براساس نتایج مدل یکپارچه، پایش فرآیند در دوره‌های زمانی با طول یکسان ۳/۷ ساعت صورت می‌گیرد. به این ترتیب که نمونه‌ای تصادفی به اندازه ۲۷ گرفته شده و آماره \bar{x} بر یک نمودار کنترل با حدود کنترل ۳ ترسیم می‌شود. حداکثر طول زمانی یک سیکل تولید ۳۷ ساعت و حداکثر تعداد دوره‌های بازرسی ۱۰ است. به کارگرفتن سیاست فوق برای پایش فرآیند منجر می‌شود که ارزش انتظاری هزینه سیستم در واحد زمان به مقدار ۱۵۹/۶۸ برسد. از طرف دیگر، نتیجه اعمال مدل نت نشان می‌دهد که هر سیکل تولید پس از طی ۲۴/۴ ساعت، پس از بازرسی نت و اعمال PM و یا RM به اتمام می‌رسد. ECT در مدل نت برابر با ۱۶۹/۶ است. براساس نتایج مدل SPC، در فواصل زمانی ثابت ۳/۷، نمونه‌ای به اندازه ۲۷ از فرآیند گرفته و مقدار آماره \bar{x} بر نمودار کنترل با حد کنترل ۳ ترسیم می‌شود. ارزش انتظاری هزینه در واحد زمان برای مدل SPC، ۱۶۲/۸۹ است. در صورتی که عملیات نت و SPC به صورت جداگانه و مستقل انجام گیرد به عبارتی از مدل ناهماهنگ استفاده شود آنگاه ارزش انتظاری هزینه در واحد زمان ۱۶۴/۵۰ می‌باشد. براین اساس با به کارگیری مدل یکپارچه در حدود ۳٪ در هزینه‌های تولید صرفه‌جویی می‌شود.

جدول (۴). نتیجه بهینه‌سازی در حالت توزیع وایبل

	مدل جداگانه نت- SPC	مدل نت	مدل SPC	مدل یکپارچه نت- SPC
ECT	۱۶۴/۵	۱۶۹/۶	۱۶۲/۸۹	۱۵۹/۶۸
t_1	۳/۷	-	۳/۷	۳/۷
k	۳	-	۳	۳
n	۲۷	-	۲۷	۲۷
m	۷	-	-	۱۰
t_m	۲۴/۴	۲۴/۴	-	۳۷

$$\text{Subject to } \frac{1}{\alpha} > ARL_0, \quad \frac{1}{1-\beta} \leq ARL_1$$

تابع هدف مقدار ECT سیستم را حداقل می‌کند. مقادیر $E[CT]$ و $E[TT]$ در مدل فوق از روابط (۲۱) و (۲۲) محاسبه می‌شود. متغیرهای تصمیم شامل زمان‌های بازرسی از فرآیند $(t_1, t_2, \dots, t_{m-1})$ ، حداکثر طول سیکل تولید (t_m) ، حداکثر تعداد دوره‌های بازرسی (m) ، اندازه نمونه (n) و حدود کنترل (k) می‌باشد. محدودیت $\frac{1}{\alpha} > ARL_0$ منجر می‌شود که مقدار ARL نمودار در حالت تحت کنترل از مقدار ARL_0 بیشتر باشد. هدف از این محدودیت این است که از هشدارهای اشتباه بیش از حد نمودار جلوگیری شود. محدودیت $\frac{1}{1-\beta} \leq ARL_1$ منجر به بهبود قابلیت نمودار کنترل در تشخیص حالت خارج از کنترل می‌شود.

۵. بررسی عملکرد فرآیند براساس مکانیزم‌های مختلف خرابی

در این قسمت مدل‌های ارائه شده تحت مکانیزم‌های مختلف خرابی فرآیند مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت. توزیع‌های احتمالی مختلفی برای بیان مکانیزم خرابی فرآیند مورد استفاده محققین قرار گرفته است. در این بخش، توزیع‌هایی مورد بررسی قرار گرفته است که در مباحث پایایی و نگهداری و تعمیرات متداول تر می‌باشند. توزیع‌های مورد بررسی شامل ۵ مورد زیر است:

- (۱) توزیع وایبل
- (۲) توزیع گاما
- (۳) توزیع نرمال
- (۴) توزیع نمایی
- (۵) توزیع رایلی

۵-۱. توزیع وایبل

با ارائه یک مثال موردی که برگرفته از مرجع [۷] است تحلیل‌های عددی آغاز می‌شود. کارخانه‌ای بطری‌های شیشه‌ای به منظور استفاده در نوشابه‌سازی تولید می‌کند. ضخامت شیشه‌های تولیدی به عنوان مشخصه کیفی مهم تلقی می‌شود. تولیدکننده از یک نمودار \bar{x} برای پایش فرآیند بهره می‌گیرد. هنگامی که فرآیند تحت کنترل است، مشخصه کیفی از یک توزیع نرمال با میانگین و واریانس به ترتیب μ_0 و σ^2 پیروی می‌کند. در حالت خارج از کنترل، میانگین فرآیند به مقدار $\mu_1 = \mu_0 \pm \delta\sigma$ شیفت پیدا می‌کند در حالی که واریانس فرآیند ثابت باقی می‌ماند. δ بیانگر بزرگی شیفت فرآیند است و یک مقدار ثابت فرض می‌شود. اگر فرآیند تحت کنترل باشد میانگین مشخصه کیفی موردنظر (ضخامت بطری‌ها) 10mm و در حالت خارج از کنترل این میانگین به میزان یک واحد تغییر می‌یابد به عبارت دیگر $\delta = 1$ است. برای نمودار کنترل \bar{x} مقادیر خطای نوع اول و دوم را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\alpha = 2\Phi(-k); \quad \beta = \Phi(k - \delta\sqrt{n}) - \Phi(-k - \delta\sqrt{n}) \quad (23)$$

در این رابطه $\Phi(\cdot)$ ، بیانگر تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد است.

می‌شود.

لازم به ذکر است که نتایج طرح عاملی که در جدول (۶) ارائه شده است براساس نمودار احتمال نرمال^۱ در نرم‌افزار Minitab به دست آمده است. برای هر متغیر پاسخ یک نمودار احتمال نرمال به دست می‌آید. به عنوان مثال، نمودار احتمال نرمال مربوط به متغیر پاسخ ECT در شکل (۱) آمده است. در این نمودار می‌توان اثر تمام عامل‌ها بر متغیر پاسخ موردنظر (در اینجا ECT) را ملاحظه کرد. عواملی که اثر آن‌ها بر متغیر پاسخ معنی‌دار است معمولاً عواملی هستند که از خط راست فاصله بیشتری دارند و در نمودار موردنظر با مربع قرمز رنگ متمایز شده‌اند. هر عاملی که در زیر خط نرمال باشد اثر آن بر متغیر پاسخ افزایش و عاملی که در بالای خط باشد اثر آن بر متغیر پاسخ کاهش است. با توجه به این شکل، عوامل C_0 ، W_{PM} و W_{RM} در زیر خط قرار دارند و بنابراین اثر آن‌ها بر ECT افزایشی است. یعنی افزایش این پارامترها از سطح کم به سطح زیاد مقدار ECT افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل پارامترهای مربوط به میانگین توزیع و اویل و پارامتر شکل توزیع و اویل در بالای نمودار احتمال نرمال قرار دارند و در نتیجه اثر آن‌ها بر ECT کاهش است.

۲-۵. توزیع گاما

در این قسمت فرض می‌شود که مکانیزم خرابی فرآیند از توزیع گاما به شکل زیر پیروی می‌کند.

$$f(t) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} t^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right), \quad (25)$$

$$t > 0, \alpha, \beta > 0$$

در رابطه (۲۵)، α و β پارامترهای توزیع گاما می‌باشند. مجدداً داده‌های مثال موردی بخش قبل مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض کنید مقادیر آلفا و بتا به ترتیب برابر با ۲ و ۱۰ در نظر گرفته شود. نتیجه بهینه‌سازی برای مدل‌های مختلف در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول (۷). نتیجه بهینه‌سازی مدل‌ها در حالت توزیع گاما

مدل جداگانه	مدل		
	مدل یکپارچه	مدل SPC	مدل نت SPC
ECT	۱۵۹/۶۴	۱۶۱/۸۹	۱۷۸/۲۸
t_1	۳/۵	۳/۷	-
k	۳	۳	-
n	۲۶	۲۷	-
m	۶۱	-	-
t_m	۲۱۳/۵	-	۳۰/۹

براساس این مثال می‌توان ملاحظه کرد که در نتیجه یکپارچه‌سازی تصمیمات نت و SPC هزینه به‌میزان تقریبی ۶٪ کاهش می‌یابد. در ادامه به وسیله طراحی آزمایشات، عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سطوح عوامل آلفا و بتا براساس جدول (۸) انتخاب می‌شود و سطوح سایر عوامل براساس جدول (۵) انتخاب شده است. خلاصه نتیجه این طرح عاملی در جدول (۹) ارائه شده است.

برای بررسی عوامل و پارامترهای تأثیرگذار بر مدل یکپارچه یک طرح عاملی کسری به کار گرفته می‌شود. مدل یکپارچه دارای ۱۳ پارامتر است؛ بنابراین یک طرح عاملی کسری با ۱۳ عامل و ۳۲ اجرا انجام می‌شود. به‌ویژه یک طرح عاملی 2^{13-8} به اجرا گذاشته می‌شود که دارای رزولوشن IV می‌باشد. در این طرح عاملی، اثر عامل‌های اصلی را می‌توان مستقل از اثرات متقابل مرتبه دوم بررسی کرد اما اثرات متقابل مرتبه دوم باهمدیگر همپوشانی دارند. سطوح کم و زیاد عامل‌ها براساس جدول (۵) انتخاب شده است. نتیجه این طرح عاملی در جدول (۶) خلاصه شده است. عامل‌ها که در واقع پارامترهای مدل یکپارچه هستند در ستون‌های جدول نشان داده شده‌اند متغیرهای پاسخ که در واقع متغیرهای تصمیم هستند در سطرهای این جدول نشان داده شده‌اند. علامت داخل هر سلول اثر آن عامل را بر متغیر پاسخ نشان می‌دهد. علامت مثبت بیان می‌کند که افزایش آن عامل از سطح کم به زیاد، منجر به افزایش متغیر پاسخ می‌شود. علامت (-) بیان می‌کند که افزایش آن عامل از سطح کم به زیاد، منجر به کاهش متغیر پاسخ می‌شود. نبود علامت در یک سلول بدین مفهوم است که آن عامل تأثیر معنی‌داری بر متغیر پاسخ ندارد. براساس نتایج این جدول به عنوان مثال، عوامل تأثیرگذار بر مقدار ECT شامل μ ، ν ، C_0 ، W_{PM} و W_{RM} می‌باشد. تأثیر دو عامل اول بر مقدار ECT کاهش در حالی که تأثیر سه عامل دیگر افزایش می‌باشد.

جدول (۵). سطوح کم و زیاد برای عامل‌ها

پارامتر	δ	C_f	C_v	W_I	C_0	C_1	W_{RM}	W_{PM}
سطح کم	۰/۵	۵	۰/۱	۵۰	۱۰	۲۰۰	۲۵۰۰	۱۰۰۰
سطح زیاد	۲	۱۰	۱	۲۰۰	۵۰	۶۰۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰

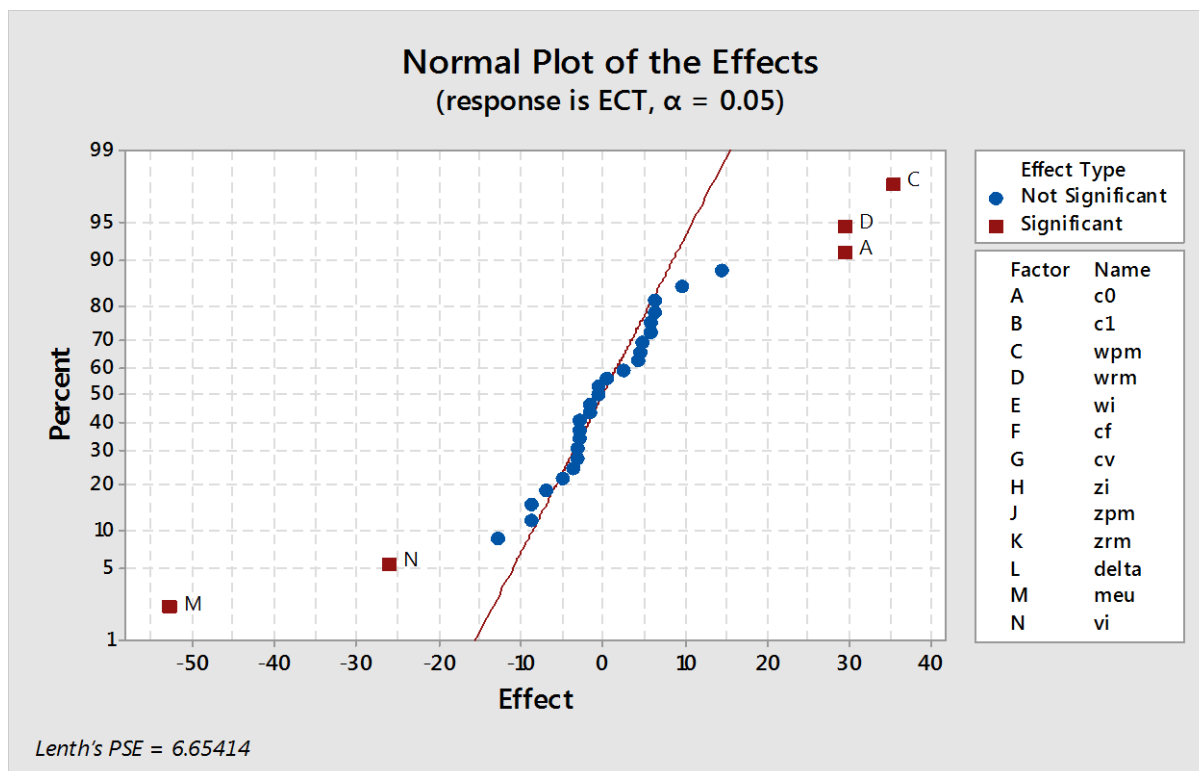
پارامتر	Z_I	Z_{RM}	Z_{PM}	μ	ν
سطح کم	۰/۳	۱	۰/۸	۱۷/۵	۲
سطح زیاد	۰/۶	۲	۱/۵	۳۰	۴

جدول (۶). خلاصه نتایج طرح عاملی برای توزیع و اویل

	C_0	C_1	δ	W_{PM}	W_{RM}	W_I	C_f	C_v	μ	ν
ECT	+			+	+				-	-
t_1										
k				+					-	-
n				-					-	-
m					+					-
t_m					+					-
IF							+			

همچنین نتایج اجرا و مقایسه ۳۲ آزمایش در مورد هر دو مدل یکپارچه و ناهماهنگ، بیانگر این موضوع است که به کار بردن مدل یکپارچه منجر می‌شود که مقدار ECT به‌طور متوسط به ۵/۸٪ کاهش یابد. در برخی از موارد کاهش تا حد ۲۳٪ درصد نیز در مقدار ECT مشاهده شده است. نتیجه طراحی آزمایشات بیانگر این مسأله است که تنها عامل تأثیرگذار بر مقدار فاکتور بهبود مقدار C_1 (هزینه عملکرد فرآیند در حالت خارج از کنترل) است. به عبارت دیگر به کار بردن مدل یکپارچه در مقادیر بزرگ‌تر C_1 ، منجر به صرفه‌جویی بیشتری در هزینه

1. Normal probability plot



شکل (۱). نمودار احتمال نرمال ECT

خرابی از توزیع نرمال پیروی کند. فرض کنید میانگین این توزیع ۲۰ و انحراف معیار ۷/۵ باشد و سایر پارامترها بر اساس جدول (۳) انتخاب شود. نتیجه بهینه‌سازی برای مدل‌های مختلف در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول (۱۰). نتیجه بهینه‌سازی مدل‌های مختلف در حالت توزیع نرمال

	نرمال			
	مدل یکپارچه نت-SPC	مدل SPC	مدل نت	مدل جداگانه نت-SPC
ECT	۱۵۴/۹۶	۱۶۱/۷	۱۵۸/۸۰	۱۵۶/۶۳
t_1	۳/۷	۳/۵	-	۳/۵
k	۳	۳	-	۳
n	۲۵	۲۶	-	۲۶
m	۷	-	-	۶
t_m	۲۲/۲	-	۲۰/۲	۲۰/۲

بر اساس این مثال می‌توان ملاحظه کرد که در نتیجه یکپارچه‌سازی تصمیمات نت و SPC هزینه‌ها به میزان تقریبی ۲٪ کاهش می‌یابد. در ادامه به‌وسیله طراحی آزمایشات، عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سطوح عوامل میانگین و انحراف معیار توزیع نرمال بر اساس جدول (۱۱) انتخاب می‌شود و سطوح سایر عوامل بر اساس جدول (۵) انتخاب شده است. خلاصه نتیجه این طرح عاملی در جدول (۱۲) است. نتیجه ۳۲ اجرای طرح عاملی بیانگر این موضوع است که اگر مکانیزم خرابی فرآیند از توزیع نرمال پیروی کند هزینه‌های سیستم در نتیجه هماهنگ‌سازی به‌طور متوسط به میزان ۶٪ کاهش می‌یابد. در برخی

جدول (۸). سطوح عوامل آلفا و بتا در توزیع گاما

پارامتر	α	β
سطح کم	۲	۷/۵
سطح زیاد	۵	۱۵

جدول (۹). خلاصه نتیجه طرح عاملی در حالت توزیع گاما

	C_0	C_1	WPM	W _I	W _{RM}	α	β	δ	C_v	C_f
ECT	+				+	-	-			
k				+				+	-	-
n			+					-		
IF		+			-		+			

نتیجه ۳۲ اجرای طرح عاملی بیانگر این موضوع است که اگر مکانیزم خرابی فرآیند از توزیع گاما پیروی کند هزینه‌های سیستم در نتیجه هماهنگ‌سازی به‌طور متوسط به میزان ۷/۴۱٪ کاهش می‌یابد. در برخی از موارد کاهش به میزان ۲۱/۶٪ نیز مشاهده شده است.

جدول (۹) بیان می‌کند که چهار عامل بر مقدار ECT تأثیرگذار است. تأثیر عوامل C_0 ، W_{RM} ، افزایشی و تأثیر عوامل α و β کاهش می‌یابد. هیچ‌کدام از پارامترهای سیستم بر متغیرهای تصمیم t_1 و t_m تأثیرگذار نبوده است و بنابراین این متغیرهای تصمیم در جدول (۹) نشان داده نشده‌اند. جدول (۹) همچنین بیان می‌کند که عوامل تأثیرگذار بر شاخص بهبود C_1 و β و W_{RM} است.

۵-۳. توزیع نرمال

در این قسمت فرض می‌شود که مکانیزم خرابی فرآیند بر اساس توزیع نرمال باشد. مجدداً مثال بخش قبل را در نظر گرفته در حالی که مکانیزم

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; t, \lambda > 0 \quad (27)$$

نتیجه بهینه‌سازی مدل‌های مختلف در مورد این مثال در جدول (۱۵) ارائه شده است. در این مثال فرض شده است میانگین توزیع نمایی موردنظر ۲۰ ساعت باشد.

جدول (۱۴). خلاصه نتیجه طرح عاملی در حالت توزیع رایلی

	C ₀	C ₁	W _{PM}	W _{RM}	W _I	C _V	δ	μ	Z _{PM}
ECT	+	+	+	+			-	-	
t ₁		-							
k		-			+	-	+		
n							-		
m			+						
t _m		-	+				+		+
IF		+		-					+

جدول (۱۵). نتیجه بهینه‌سازی مدل‌های مختلف در حالت توزیع نمایی

	مدل جداگانه نت-SPC	مدل نت-SPC	مدل نت-SPC	مدل یکپارچه نت-SPC
ECT	۱۷۱/۳۶	۱۸۵/۷	۱۶۱/۹۸	۱۵۹/۷۳
t ₁	۳/۵	-	۳/۵	۳/۵
k	۳	-	۳	۳
n	۲۶	-	۲۶	۲۶
m	۱۳	-	-	۱۰۳
t _m	۴۵/۹	۴۵/۹	-	۳۶۰/۵

براساس این مثال می‌توان ملاحظه کرد که در نتیجه یکپارچه‌سازی تصمیمات نت و SPC هزینه‌ها به میزان تقریبی ۷٪ کاهش می‌یابد. در ادامه به‌وسیله طراحی آزمایشات، عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سطح کم و زیاد میانگین توزیع نمایی به ترتیب برابر با ۱۷/۵ و ۳۰ در نظر گرفته شده است و سطوح سایر عوامل براساس جدول (۵) انتخاب شده است. خلاصه نتیجه این طرح عاملی در جدول (۱۶) ارائه شده است. نتیجه ۳۲ اجرای طرح عاملی بیانگر این موضوع است که اگر مکانیزم خرابی فرآیند از توزیع نمایی پیروی کند هزینه‌های سیستم در نتیجه هماهنگ‌سازی به‌طور متوسط به میزان ۱۴/۴۷٪ کاهش می‌یابد. در برخی از موارد کاهش به میزان ۳۷٪ نیز مشاهده شده است.

جدول (۱۶). خلاصه نتیجه طرح عاملی در حالت توزیع نمایی

	C ₀	C ₁	W _{PM}	W _{RM}	W _I	C _V	Z _{PM}	μ	δ
ECT	+	+		+				-	-
t ₁		+		+	+	+	+	-	
n		+		-			-	+	-
m		+				-		+	-
t _m		-		+		+	+	+	+
IF		+							

از موارد کاهش به میزان ۳۲٪ نیز مشاهده شده است.

جدول (۱۱). سطوح کم و زیاد پارامترهای توزیع نرمال

پارامتر	μ	σ
سطح کم	۱۷/۵	۵
سطح زیاد	۳۰	۱۰

جدول (۱۲). خلاصه نتیجه طرح عاملی در حالت توزیع نرمال

	C ₀	C ₁	W _{PM}	W _I	W _{RM}	μ	σ	δ
ECT	+	+	+	+	+	-	+	
t ₁		-				+	+	-
n								-

۴-۵. توزیع رایلی

در این قسمت فرض می‌شود مکانیزم خرابی فرآیند براساس توزیع رایلی^۱ به‌صورت زیر باشد:

$$f(t) = 2\alpha \cdot t \exp\{-\alpha t^2\}; \quad \alpha > 0 \quad (26)$$

مجدداً مثال بخش قبل در نظر گرفته می‌شود. نتیجه بهینه‌سازی مدل‌های مختلف در مورد این مثال در جدول (۱۳) ارائه شده است. در این مثال فرض شده است میانگین توزیع رایلی موردنظر ۲۰ ساعت باشد.

جدول (۱۳). نتیجه بهینه‌سازی مدل‌های مختلف در حالت توزیع رایلی

	مدل جداگانه نت-SPC	مدل نت-SPC	مدل نت-SPC	مدل یکپارچه نت-SPC
ECT	۱۶۳/۰۷	۱۶۹/۶۳	۱۶۱/۸۹	۱۵۹/۲۹
t ₁	۳/۷	-	۳/۷	۳/۷
k	۳	-	۳	۳
n	۲۹	-	۲۹	۲۷
m	۷	-	-	۱۰
t _m	۲۴/۴	۲۴/۴	-	۳۷

براساس این مثال می‌توان ملاحظه کرد که در نتیجه یکپارچه‌سازی تصمیمات نت و SPC، هزینه‌ها به میزان تقریبی ۳٪ کاهش می‌یابد. در ادامه به‌وسیله طراحی آزمایشات، عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سطح کم و زیاد میانگین توزیع رایلی به ترتیب برابر با ۱۷/۵ و ۳۰ در نظر گرفته شده است و سطوح سایر عوامل براساس جدول (۵) انتخاب شده است. خلاصه نتیجه این طرح عاملی در جدول (۱۴) ارائه شده است. نتیجه ۳۲ اجرای طرح عاملی بیانگر این موضوع است که اگر مکانیزم خرابی فرآیند از توزیع رایلی پیروی کند هزینه‌های سیستم در نتیجه هماهنگ‌سازی به‌طور متوسط به میزان ۵/۹٪ کاهش می‌یابد. در برخی از موارد کاهش به میزان ۲۶٪ نیز مشاهده شده است.

۴-۵. توزیع نمایی

در این قسمت فرض می‌شود مکانیزم خرابی فرآیند براساس توزیع نمایی به‌صورت زیر باشد:

1. Rayleigh distribution

۶. نتیجه گیری

توسعه مدل‌های این تحقیق براساس تلفیق سه تکنیک صورت گرفته است که عبارتند از: ۱- فرآیند تجدید پاداش، ۲- در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای تکامل فرآیند در یک بازه بازرسی و ۳- معادلات بازگشتی. کاربرد این سه تکنیک باهم دیگر منجر شد که مدل‌هایی توسعه داده شود که فرضیات محدود کننده کمتری نسبت به مدل‌های قبلی پیشنهادی نت-SPC داشته باشد. مدل‌های ارائه شده در مورد مکانیزم‌های خرابی کاربرد دارند که نرخ خرابی آن غیرنزولی باشد. غیرنزولی بودن نرخ خرابی فرآیند از آنجا در نظر گرفته شده است که اصولاً اجرای نت پیشگیرانه بر روی سیستم‌هایی با نرخ خرابی نزولی به صرفه نیست. براین اساس بسیاری از توزیع‌ها را می‌توان در مدل‌های ارائه شده به کار برد. سیستم تولید یک مرحله‌ای، تحت سناریوهای مختلف برای بیان مکانیزم خرابی فرآیند (توزیع وایبل، نرمال، گاما، نمایی و رایلی) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از اجرای طرح‌های عاملی بیانگر این مسأله است که نوع مکانیزم خرابی فرآیند بر میزان صرفه‌جویی حاصل از یکپارچه‌سازی تصمیمات نت-SPC تأثیرگذار است. اگرچه میزان صرفه‌جویی در حالت‌های توزیع نرمال، گاما، وایبل و رایلی تقریباً یکسان و در حدود ۶% می‌باشد اما در حالتی که مکانیزم خرابی فرآیند براساس توزیع نمایی باشد، هماهنگ‌سازی تصمیمات نت-SPC می‌تواند منجر به کاهش بیشتری در هزینه‌های عملیاتی شود. میزان کاهش در هزینه‌های سیستم در حالت توزیع نمایی به‌طور متوسط ۱۴/۵% مشاهده شد.

مراجع

- [5] Z. Mehrafrooz and R. Noorossana, "An integrated model based on statistical process control and maintenance," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 61, no. 4, pp. 1245–1255, 2011.
- [6] G. Tagaras, "An integrated cost model for the joint optimization of process control and maintenance," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 39, no. 8, pp. 757–766, 1988.
- [7] W. Zhou and G. Zhu, "Economic design of integrated model of control chart and maintenance management," *Math. Comput. Model.*, vol. 47, pp. 1389–1395, 2008.
- [8] Y. Kuo, "Optimal adaptive control policy for joint machine maintenance and product quality control," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 171, pp. 586–597, 2006.
- [9] T. G. Yeung, C. R. Cassady, and K. Schneider, "Simultaneous optimization of [\bar{X}] control chart and age-based preventive maintenance policies under an economic objective - control chart," *III Trans.*, vol. 40, pp. 147–159, 2008.
- [10] K. Linderman, K. E. McKone-Sweet, and J. C. Anderson, "An integrated systems approach to process control and maintenance," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 164, no. 2, pp. 324–340, 2005.
- [11] S. Panagiotidou and G. Tagaras, "Statistical Process Control and Condition-Based Maintenance: A Meaningful Relationship through Data Sharing," *Prod. Oper. Manag.*, vol. 19, no. 2, pp. 156–171, 2010.
- [12] S. Panagiotidou and G. Tagaras, "Optimal integrated process control and maintenance under general deterioration," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 104, pp. 58–70, 2012.
- [13] L. Liu, M. Yu, Y. Ma, and Y. Tu, "Economic and economic-statistical designs of an X-bar control chart for two-unit series systems with condition-based maintenance," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 226, no. 3, pp. 491–499, 2013.
- [14] Jianlan Zhong & Yizhong Ma, "An integrated model based on statistical process control and maintenance for two-stage dependent processes," *Commun. Stat. - Simul. Comput.*, vol. 46, no. 1, pp. 106–126, 2017.
- [15] H. Rasay, F. Naderkhani, F. Azizi, "Opportunistic maintenance integrated model for a two-stage manufacturing process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.119, no.11-12, pp. 8173-8191, 2022.
- [16] H. Rasay, Sh. Taghipour, M. Sharifi, "An integrated Maintenance and Statistical Process Control Model for a Deteriorating Production Process", *Reliability Engineering and System Safty*, Vol.228, pp-108774, 2022.
- [17] S.M. Hadian, H. Farughi, H. Rasay, "Joint planning of maintenance, buffer stock and quality control for unreliable, imperfect manufacturing systems", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.157, pp-107304, 2021.
- [1] H. Yin, G. Zhang, H. Zhu, Y. Deng, and F. He, "An integrated model of statistical process control and maintenance based on the delayed monitoring," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 133, pp. 323–333, 2015.
- [2] H. Rasay, S.M. Hadian, F. Naderkhani, F. Azizi, "Optimal condition based maintenance using attribute Bayesian control chart." *Journal of Risk and Reliability*, 2023.
- [3] Y. Xiang, "Joint optimization of X -bar control chart and preventive maintenance policies : A discrete-time Markov chain approach," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 229, no. 2, pp. 382–390, 2013.
- [4] Ben Daya.M and Rahim.M.A, "Effect of maintenance on the economic design of x -bar control chart," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 120, pp. 131–143, 2000.



DOI: 10.22084/IER.2023.27913.2130

Investigating the Effect of Different Failure Mechanisms of Manufacturing Processes in Model Integration Maintenance and Repairs and Statistical Process Control by Design of Experiment

H. Rasaei^{1*}, H. Faroughi²

¹ Assistant Professor, Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering Management, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

² Professor of Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023/1/28

Accepted: 2023/4/24

Keywords:

Failure Mechanism
Integrated Model
Design of Experiment
Maintenance

ABSTRACT

Both in the academic environment and in the realm of operation, it has been shown that there is a close relationship between product quality and maintenance of equipment. Thus, coordination of the decisions associated with maintenance and quality can lead to decrease in operational costs of a production system and improve the overall productivity. To coordinate the decisions related to maintenance and statistical process control, this thesis develops integrated mathematical models. The system performance is compared in two states: (1) while there is a coordination between the decisions of maintenance and SPC, (2) while the decisions of maintenance and SPC are conducted separately, and indeed, there is no coordination between SPC and maintenance. To determine the system performance in state 1, an integrated model of SPC and maintenance is developed. Optimization of the integrated model determines the value of ECT in state 1. To determine the system performance in the uncoordinated state, i.e., state 2, the following steps are performed: (1) a stand-alone model of maintenance is proposed, (2) a stand-alone model of SPC is developed, (3) according to the results of optimization of step 1 and 2, the value of ECT in the uncoordinated state is computed. Finally, comparison of the values of ECT in the coordinated state and uncoordinated state clarifies that, due to the performance of the integrated model, how much saving in operational cost is obtained. For the systems investigated in the thesis, using factorial designs, the effect of the system parameters on the decision variables and the objective function is analyzed. Also, it is investigated that, with respect to the operational costs, what circumstances are more suitable for implementing the integrated models of SPC and maintenance. According to the results of the study, integration of the decisions associated with maintenance and SPC leads to a better performance. The amount of saving obtained from the coordination is significant for the different production systems.

* Corresponding author. H. Rasaei

Tel.: 021-85692191; E-mail address: H.Rasay@Kut.ac.ir