



برنامه‌ریزی هم‌زمان نگهداری و تعمیرات و کنترل موجودی انبار قطعات یدکی: مطالعه موردی ربات شاتل پیش رنگ شرکت خودروسازی

سید محمدرضا ابوالبقایی

گروه مهندسی صنایع، واحد الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

داود محمدی تبار (نویسنده مسؤل)

استادیار دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Email: d_mohammaditabar@azad.ac.ir

صدیق رئیسی

دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۴/۱۵ * تاریخ پذیرش ۹۸/۰۷/۱۷

چکیده

برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیر (نت) ماشین‌آلات کارخانه یکی از ابزار مهم در کاهش هزینه‌های عملیاتی است؛ مدیریت کنترل موجودی قطعات یدکی نقش پررنگی در عملکرد سیاست های نت دارد. در این تحقیق مدل‌سازی یکپارچه موجودی قطعات یدکی و برنامه‌ریزی نت جهت تعیین سطح بیشینه موجودی و دوره بازپرسازی در سیستم (S,T) به همراه تعیین زمان بهینه تعویض پیشگیرانه ارائه می‌شود. مجموع هزینه‌های مرتبط با نظام نت، نظیر هزینه سفارش دوره‌ای و اضطراری و هزینه‌های امور بازرسی و تعمیرات در تابع هدف مدل کمینه می‌شوند. برای نشان دادن توانمندی و کارایی مدل، نتایج مطالعه موردی در خطوط پیش رنگ یک شرکت خودروسازی برای تعیین سیاست‌های مدیریت موجودی قطعه‌ای پرمصرف و بحرانی پیاده‌سازی شده‌است. همچنین به منظور تحلیل پایداری نتایج تحقیق، حساسیت نتایج به تغییرات پارامترهای ورودی بررسی شده‌است. براساس نتایج، هزینه کل متأثر از نرخ خرابی، مدت‌زمان تأمین قطعه و هزینه تعویض قطعات معیوب است و در این خصوص بیشترین حساسیت را به مقادیر نرخ خرابی و مدت‌زمان تأمین قطعه دارد. استفاده از نتایج تحقیق در مواردی که نرخ خرابی نسبتاً ثابت است توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی نت، کنترل موجودی، قطعات یدکی، فرآیند پواسان.

۱- مقدمه

کنترل موجودی قطعات یدکی یکی از مباحث مهم در صنعت است که در عملکرد برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات نقش پررنگی دارد. در مدیریت موجودی، باید یک توازن بین سطح موجودی قطعات یدکی و هزینه و ریسک ناشی از عدم وجود قطعه به هنگام نیاز برقرار نمود. واضح است که سطح موجودی قطعات یدکی متأثر از خصوصیات دستگاه‌ها و قابلیت اطمینان آن‌هاست. سطح موجودی قطعات یدکی و زمان بندی تعمیرات دو مفهوم بسیار مهم و دو مقوله اساسی هستند که تحقق و عمل به آن‌ها موجبات بقا و تداوم خطوط مختلف تولید و کاهش هزینه‌ها را فراهم می‌آورد. تقاضای قطعات یدکی در یک کارخانه می‌تواند ناشی از شکست در حین عملیات یا نیاز به تعمیرات پیشگیرانه باشد. اگر یک قطعه یدکی دلخواه در طی یک شکست یا در یک دوره تعمیر و نگهداری برنامه ریزی شده در دسترس نباشد، زمان بیکاری کارخانه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، انباشته شدن بیش از حد قطعات، هزینه نگهداری موجودی را افزایش می‌دهد (کیلی^۱ و همکاران، ۲۰۰۹).

یک سیستم کنترل موجودی کارا به منظور تأمین قطعات مورد نیاز آتی نیازمند اطلاعات مربوط به پیش‌بینی میزان کل تقاضا، برآورد تابع توزیع تقاضا در فاصله زمانی تحویل و دسته‌بندی قطعات به منظور ارائه مدل متناسب با هر دسته است (تسلیمی^۲ و همکاران، ۱۳۸۹). سعیدی سوق^۳ و همکاران (۱۳۹۴) از شبیه‌سازی مونت کارلو به منظور بهینه‌سازی ترکیبی فعالیت‌های نت مبتنی بر وضعیت موجودی قطعات یدکی استفاده کردند. حیدری^۴ (۱۳۹۵) بیان داشت که کاهش هزینه‌های تولید یکی از دغدغه‌های اصلی سیستم‌های تولیدی است که رفع آن مستلزم به‌کارگیری مؤثر منابع است. تعمیرات و مدل‌های کنترل موجودی قطعات یدکی در این راه به مؤسسات تولیدی کمک می‌کنند. بهارستان و گلشن^۵ (۱۳۹۵) بیان داشتند که کنترل موجودی قطعات یدکی برای بسیاری از سازمان‌ها ضروری است و یک متدولوژی برای کنترل موجودی قطعات یدکی پیشنهاد کردند. این متد بر اساس طبقه‌بندی و دسته‌بندی قطعات یدکی در گروه‌هایی با ویژگی‌های مشابه استوار است.

والمحمدی^۶ و همکاران (۱۳۹۶) به انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیرات به منظور بهبود شاخص‌های ارزیابی قابلیت اطمینان و تعمیر پذیری پرداختند. پاناگیوتیدون^۷ (۲۰۱۴) به مدل سازی هم زمان سفارش قطعات یدکی و زمان بندی نگهداری و تعمیرات پرداختند. ایشان دو نوع شکست برای اجزاء در نظر گرفتند. یک شکست جزئی، که منجر به عملکرد بد تجهیزات و ماشین آلات می‌شود و یک شکست مهم و قابل توجه که منجر به توقف کامل دستگاه می‌گردد. کایزر و همکاران^۸ (۲۰۱۷) به تصمیم‌گیری هم زمان نگهداری و تعمیرات و سفارش دهی قطعات یدکی در یک سیستم چند جزئی پرداختند. آنها نتیجه‌گیری کردند که برخلاف سیستم تک جزئی که یک زمان بهینه برای بازرسی و اندازه بهینه برای حداکثر موقعیت موجودی تعیین می‌شود، در حالت چند جزئی باید تعیین این مقادیر مبتنی بر حالت سیستم باشد. به بیان دیگر بر اساس وضعیت اجزاء، موقعیت موجودی قطعات یدکی و زمان مورد انتظار برای دریافت سفارش‌های در راه، تصمیمات موجودی و نگهداری و تعمیرات اتخاذ می‌شود.

کایزر و همکاران^۹ (۲۰۱۸)، بیان داشتند که اجزای مازاد اغلب برای دستیابی به قابلیت دسترسی سیستم ضروری است. مزیت دیگر اجزای مازاد این است که بار کل سیستم را می‌توان در میان اجزاء به اشتراک گذاشت. در نتیجه جلوگیری از خراب شدن سریع از یک سو و انگیزه برای جایگزینی اجزای دچار شکست در اسرع وقت فراهم می‌شود. وقوع یک شکست جزئی باعث افزایش بار در اجزای باقی‌مانده می‌شود. آنها به بهینه‌سازی مشترک نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط و برنامه ریزی قطعات یدکی برای سیستم‌های چند جزئی پرداختند. مدل سازی آنها بر اساس فرایند مارکوف، به منظور به حداقل رساندن هزینه متوسط

¹ Kilpi

² Taslimi

³ Saeedi Sogh

⁴ Heidari

⁵ Baharestan & Golshan

⁶ Valmohammadi

⁷ Panagiotidou

⁸ Minou C. A et al

⁹ Olde Keizer et al

طولانی مدت در واحد زمان تشکیل ارائه شد. زاهدی حسینی^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۷)، به مقایسه سیاست های مرور دائم و دوره ای در تصمیم گیری هم زمان بازرسی تعمیرات و سفارش دهی قطعات یدکی پرداختند. با بکارگیری ابزار شبیه سازی در پیاده سازی مدل در یک کارخانه کاغذسازی نتیجه گیری کردند که سیاست مرور دوره ای که در آن طول زمان سفارش قطعات یدکی دو برابر طول زمان بازرسی تعمیرات است، سیاست بهینه خواهد بود. ژانگ و زنگ^{۱۱} (۲۰۱۷) در یک سیستم چند جزئی با اجزای مشابه، به مدل سازی هم زمان نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط و مدیریت قطعات یدکی پرداختند. مقدار متغیرهای مدل بر اساس نرخ شکست کل سیستم و وضعیت قطعات یدکی محاسبه شد. مدل توسعه داده شده در یک نیروگاه بادی به کار گرفته شد. زاهدی حسینی و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از ابزار شبیه سازی به بررسی عملکرد هم زمان سیاست نگهداری و تعمیرات و کنترل موجودی قطعات یدکی در یک سیستم تولید موازی پرداختند. هدف آنها تعیین زمان بازرسی سیستم نگهداری و تعمیرات، زمان سفارشات دوره ای و حداکثر موقعیت موجودی است. آنها نتیجه گیری کردند که در سیاست بهینه، زمان بازرسی و زمان سفارش قطعات یدکی با هم برابر است.

سایدیکو^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸) بیان داشتند که نگهداری بهینه ماشین آلات کارخانه یکی از اهداف مهم کاهش هزینه‌های عملیاتی است و به همین علت توسعه سیاست‌های کنترل موجودی قطعات یدکی یکی از مهم‌ترین اولویت‌های نت است. ایشان به توسعه مدل هم‌زمان نت و موجودی قطعات یدکی برای یک سیستم با چند جز مشابه پرداختند و از سیاست‌های نت با دوره زمانی ثابت و سیاست‌های کنترل موجودی با بررسی دوره‌ای قطعات یدکی استفاده کردند. متغیرهای تصمیم مدل آنها شامل مقدار سفارش و نسبت دوره سفارش به فاصله تعمیرات پیشگیرانه است. همچنین ایشان فرض کردند که تابع شکست اجزاء از توزیع پواسان پیروی کرده و خرابی در هر دو حالت قابل تعمیر و غیر قابل تعمیر مورد بررسی قرار گرفت.

جدول شماره (۱): جدول شکاف تحقیقاتی

مطالعه موردی	سیستم چند جزئی	حداقل کردن هزینه نهایی نت	تعیین زمان بهینه تعویض پیشگیرانه	کنترل موجودی قطعات یدکی	مراجع / سال
				*	سعیدی سوق و همکاران (۱۳۹۴)
*		*		*	حیدری (۱۳۹۵)
				*	بهارستان و گلشن تفتی (۱۳۹۵)
*				*	والمحمدی و همکاران (۱۳۹۶)
		*			پاناگیوتیدون (۲۰۱۴)
	*			*	کایزر و همکاران (۲۰۱۷)
*	*			*	ژانگ و زنگ (۲۰۱۷)
*				*	کایزر و همکاران (۲۰۱۸)
*				*	زاهدی حسینی و همکاران (۲۰۱۷)
				*	زاهدی حسینی و همکاران (۲۰۱۸)
*	*	*		*	سایدیکو و همکاران (۲۰۱۸)
*	*	*	*	*	تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر، تعدادی از سوابق و پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه نت و کنترل موجودی قطعات یدکی ذکر گردیده است که خلاصه آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۱ مشخص است و با بررسی تحقیقات پیشین مشاهده گردید، بیشتر محققین به صورت مجزا به بحث کنترل موجودی قطعات یدکی و نت پرداخته‌اند. از بین تحقیقات اخیر که به‌طور هم‌زمان به بررسی کنترل موجودی و نت پرداخته بودند، تحقیق سایدیکو و همکاران (۲۰۱۸) نزدیک ترین مقاله با تحقیق حاضر است. از تفاوت های اصلی این تحقیق و مقاله سایدیکو و همکاران (۲۰۱۸) می توان به تعیین زمان بهینه تعویض پیشگیرانه در

¹⁰ Zahedi-Hosseini

¹¹ Xiaohong Zhang, Jianchao Zeng

¹² Siddique et al

مدلسازی هم زمان موجودی قطعات یدکی و زمان بندی نگهداری تعمیرات، و همچنین پیاده سازی مدل در یک مطالعه موردی اشاره کرد. بنابراین لحاظ کردن هم زمان مدیریت موجودی قطعات یدکی و زمان بندی تعمیرات پیشگیرانه، لحاظ کردن یک سیستم چند جزئی مشابه و پیاده سازی مدل در یک مطالعه موردی را می توان از اصلی ترین نوآوری های اصلی این مقاله نام برد.

۲- روش شناسی

هدف از این تحقیق حداقل کردن هزینه نهایی نت و موجودی قطعات یدکی در یک ماشین با چند جزء مشابه است. بر این اساس به توسعه مدلی برای تعیین نقطه بهینه سطح موجودی قطعات یدکی برای استفاده در بخش های مختلف ماشین و نیز تعیین سیکل سفارش موجودی و زمان تعمیرات پیشگیرانه می پردازیم. مدل سازی برای شرایطی ارائه می شود که زمان وقوع شکستها بر اساس فرآیند پواسون با نرخ شکست ثابت است و خرابی های دستگاه غیرقابل تعمیر بوده و در صورت خرابی قطعه تعویض می شود. تابع هدف مدل شامل هزینه نگهداری، هزینه سفارش منظم، هزینه سفارش اضطراری و هزینه نگهداری سیستم نت است. به منظور رسیدن به اهداف تحقیق جاری، بایستی زمان بهینه تعویض پیشگیرانه با توجه به باقی مانده عمر دستگاه تعیین شود. هرگاه خرابی اتفاق بیفتد هزینه تعویض به دلیل خرابی پرداخت می شود؛ ولی اگر خرابی اتفاق نیفتد، در زمان برنامه ریزی شده ماشین تعمیرات پیشگیرانه انجام می شود و هزینه تعویض پیشگیرانه پرداخت می شود. بنابراین ماشین به دو دلیل عمده زیر از مدار خارج می شود:

۱. از کارافتادگی قطعات اصلی که موجب توقف دستگاه می شود

۲. نت پیشگیرانه در زمان سرویس دوره ای

عدم پیش بینی مناسب برای تأمین قطعات یدکی و مصادف شدن کمبود این قطعات با زمان تعمیرات موجب به وجود آمدن هزینه هایی بالایی خواهد شد و این موضوع تمرکز و شالوده اصلی این تحقیق است. با توجه به تعریف مسئله، مفروضات مدل به شرح زیر است.

الف) مفروضات مدل

مفروضاتی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می گیرد به شرح زیر است:

۱. عملیات تعویض در سیستم موجب بهینه سازی و قابلیت استفاده تجهیز در حالت اولین استفاده می شود.^{۱۳}
۲. زمان مورد نیاز برای انجام سرویس های دوره ای یا هرگونه عملیات تعویض قطعات سیستم در مقایسه با زمان فرآیند ناچیز و قابل اغماض است.
۳. شکستها در سیستم از توزیع پواسون پیروی می کند. در این صورت تابع جرم احتمال تعداد شکستها در t واحد زمان به صورت زیر خواهد بود:

$$f(x, \lambda t) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^x}{x!} \quad (\text{رابطه ۱})$$

۴. فواصل سفارش قطعات یدکی (t_0)، به صورت ضربی صحیح از مدت زمان سرویس دوره ای (t_p) فرض می شود. در این صورت خواهیم داشت:

$$k = \frac{t_0}{t_p} \quad (\text{رابطه ۲})$$

۵. مدت زمان تأمین قطعات سفارش داده شده یا به عبارت دیگر زمان تدارک (L)^{۱۴} کمتر از مدت زمان تعمیرات و زمان بررسی سطح موجودی است ($L < t_p \leq t_0$)
۶. مدت زمان تحویل سفارش برای حالت اضطراری قابل اغماض است.
۷. هزینه بروز شکست در سیستم (C_f) بسیار بیشتر از هزینه نت سیستم (C_p) است ($C_f > C_p$)

¹³ As-Good-As New

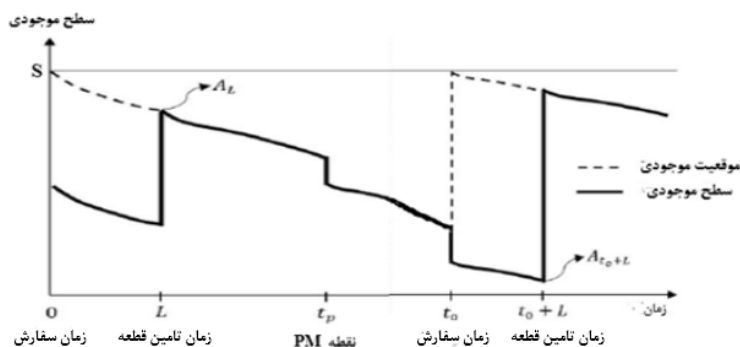
¹⁴ Regular inventory lead time

معمولاً فرض ۱ در ادبیات نت مورد استفاده قرار می‌گیرد که مبتنی بر نظریه نوسازی کوکس است (کوکس^{۱۵}، ۱۹۶۲). پیش‌فرض ۲ برگرفته از تحقیق بارلو و پروسچان^{۱۶} (۱۹۶۵) حاصل می‌شود که زمان جایگزینی در مقایسه با دوره‌های بررسی، می‌تواند نادیده گرفته شود. با توجه به سفارش‌های اضطراری، قطعات یدکی در یک زمان کوتاه خریداری می‌شوند، بنابراین زمان تأمین مجدد اضطراری را می‌توان صفر در نظر گرفت و این فرض به‌طور گسترده در ادبیات موجودی مورد استفاده قرار می‌گیرد (وانگ^{۱۷}، ۲۰۱۱). فرضیه ۳، رایج‌ترین فرضیه در ادبیات نت است که بسیاری از محققان از این فرض استفاده کرده‌اند (بارلو و پروسچان، ۱۹۶۵). با توجه به توصیف مسئله، قطعات یدکی تنها بعد از تعویض PM سفارش داده می‌شوند که محاسبه مقدار سفارش را بسیار آسان می‌کند. بنابراین فرض ۴ برای ساده‌سازی مدل بسیار مفید است. فرضیه ۵ معمولاً در تحقیقات موجود در بررسی دوره‌ای (هاریگا و بن دایا، ۱۹۹۹؛ چانگ و گوتیر، ۱۹۹۶)^{۱۸} مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرضیه ۶ یک دیدگاه رایج در صنعت است که هزینه‌های خرابی ناخواسته بیشتر از جایگزینی پیشگیرانه برنامه‌ریزی شده است.

از آنجا که سیستم موجودی کارخانه بر اساس بازنگری دوره‌ای با دوره زمانی ثابت است، انتخاب صحیح دوره‌های بررسی موجودی قطعات و تعمیرات پیشگیرانه و همچنین سطح مناسب موجودی موجب بهبود عملیات نت ماشین خواهد شد. از این رو دسترسی به اطلاعات قطعات یدکی از اهمیت بالایی برخوردار است. به این دلیل ما به دنبال یک سیاست برنامه‌ریزی هم‌زمان نت و کنترل موجودی قطعات یدکی هستیم که نقطه حداکثر موقعیت موجودی و سیکل سفارش در سیستم (S, T) تعیین شود. در ادامه به تشریح دقیق تر سیستم (S, T) می‌پردازیم.

(ب) سیستم دوره سفارش (S, T)

در سیستم کنترل موجودی بر اساس دوره سفارش که به سیستم دوره ثابت سفارش^{۱۹} معروف است، در زمان‌های ثابت و مشخص (مثلاً هر هفته، هر ماه و یا هر چند ماه یک‌بار) مقدار موجودی کالا بررسی می‌شود. آنگاه سفارش برای کالا به مقداری صادر می‌شود که جمع مقادیر موجودی کالا در زمان بررسی و مقدار سفارش داده‌شده، به یک مقدار حداکثر ثابت و تعیین‌شده برسد. نمودار موجودی - زمان (S, T) برای این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل شماره (۱): نمودار موجودی - زمان در سیستم (S, T)

همان‌گونه که در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد، مقدار موجودی کالا در ابتدای هر سیکل بررسی شده و به مقداری سفارش داده می‌شود که سطح موقعیت موجودی به مقدار S برسد. بنابراین چنانچه Q_i و i به ترتیب نشان‌دهنده مقدار سفارش و مقدار موجودی در دسترس در ابتدای سیکل سفارش باشد خواهیم داشت:

$$Q_i = S - i \quad (\text{رابطه ۳})$$

در مورد سیستم (S, T) توجه به چند نکته زیر ضروری است:

- مدت‌زمان تحویل در سیکل‌های مختلف لزوماً یکسان نیستند.

¹⁵ Cox

¹⁶ Barlow and proschan

¹⁷ Wang

¹⁸ Hariga & Ben-Daya; Chi Chiang & Gutierrez,

¹⁹ Fixed Order Interval System (FOI)

- طول زمانی سیکل‌های مختلف مساوی می‌باشند.
 - مقادیر سفارش Q_i لزوماً با یکدیگر یکسان نخواهد بود.
- با توجه به تعریف مسئله و مفروضات بیان شده، در ادامه به ارائه پارامترها و متغیرهای مسئله می‌پردازیم. پارامترهای مورد استفاده در جدول ۲ شرح داده شده است.

جدول شماره (۲). پارامترهای مدل بهینه‌سازی

پارامتر	توضیحات
m	تعداد اجزای یکسان
C_p	هزینه تعویض پیشگیرانه
C_f	هزینه تعویض به دلیل خرابی
R	هزینه ثابت سفارش دوره ای
C_e	هزینه ثابت سفارش اضطراری
L	زمان تدارک
$D(t)$	تقاضای قطعه یدکی در t واحد زمانی
$f(x, \lambda t)$	تابع جرم احتمال تعداد شکست قطعه در t واحد زمان
λ	نرخ خرابی هر قطعه
λ_0	نرخ خرابی ماشین
h	هزینه نگهداری هر قطعه در واحد زمان

متغیرهای تصمیم مدل در جدول ۳ ارائه شده اند.

جدول شماره (۳): متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی

نام متغیر	توضیحات
S	حداکثر سطح موجودی
t_p	فاصله بین تعمیرات پیشگیرانه
$k = \frac{t_0}{t_p}$	عدد صحیح مثبت

در ادامه مدل سازی مسئله و محدودیت‌های مربوط به آن شرح داده شده و پس از آن، آزمایش‌های عددی در مطالعه موردی به‌منظور نشان دادن کاربردی بودن مدل ارائه می‌شود. بر اساس تعریف مسئله، هزینه کل (TC) که در رابطه ۴ ارائه شده شامل هزینه نگهداری، هزینه سفارش منظم، هزینه سفارش اضطراری و هزینه تعمیرات است.

$$TC = C_h + C_o^r + C_o^e + C_m \quad (\text{رابطه ۴})$$

مقادیر مربوط به هزینه نگهداری موجودی، هزینه سفارش منظم، هزینه سفارش اضطراری و هزینه نت در ادامه مقاله شرح داده می‌شود. لازم به ذکر است نحوه محاسبه هزینه های کلاسیک موجودی در حالتی که نرخ مصرف قطعات بر اساس فرایند پواسون بوده را می‌توان در مقاله سادیکو و همکاران (۲۰۱۸) نیز مشاهده کرد. در مدل سازی سادیکو و همکاران (۲۰۱۸)، طول زمان تعمیرات پیشگیرانه به عنوان یک پارامتر لحاظ شده بود و بنابراین هزینه های نت در تابع هدف مدل ایشان به عنوان یک جزء ثابت، تاثیری در مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم نداشت. ولی در تحقیق جاری محاسبه زمان بهینه تعویض پیشگیرانه (t_p) به عنوان متغیر تصمیم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

(ج) متوسط هزینه نگهداری موجودی (C_h)

متوسط سطح موجودی درست پس از دریافت سفارش (A_L) به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$A_L = [S - D(L)]^+ = \sum_{x=0}^S (S - x) f(x, \lambda L) \quad (\text{رابطه ۵})$$

متوسط سطح موجودی درست قبل از دریافت سفارش (A_{t_0+L}) بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$A_{t_o+L} = [S - km - D(t_o + L)]^+ = [S - km - D(L + kt_p)]^+ \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$A_{t_o+L} = \sum_{x=0}^{S-km} (S - km - x) f(x, \lambda(kt_p + L)) \quad (\text{رابطه ۷})$$

بنابراین متوسط سطح موجودی بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

$$\frac{A_L + A_{t_o+L}}{2} = \frac{1}{2} \left[\sum_{x=0}^S (S - x) f(x, \lambda L) + \sum_{x=0}^{S-km} (S - km - x) f(x, \lambda(kt_p + L)) \right] \quad (\text{رابطه ۸})$$

از این رو، متوسط هزینه نگهداری مورد انتظار در واحد زمان (C_h) به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$C_h = \frac{1}{2} h \left[\sum_{x=0}^S (S - x) f(x, \lambda L) + \sum_{x=0}^{S-km} (S - km - x) f(x, \lambda(kt_p + L)) \right] \quad (\text{رابطه ۹})$$

(د) متوسط هزینه سفارش منظم (C_o^r)

قطعات در ابتدای هر چرخه موجودی سفارش داده می‌شود. متوسط هزینه سفارش در واحد زمان به صورت رابطه ۱۰ نمایش داده می‌شود.

$$C_o^r = \frac{R}{t_o} = \frac{R}{kt_p} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

(ه) متوسط هزینه سفارش اضطراری (C_o^e)

تعداد واحدهای سفارش اضطراری در هر سیکل سفارش از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} [D(t_o) + km - S]^+ &= \sum_{x=S-km+1}^{\infty} (x + km - S) f(x, \lambda kt_p) \\ &= \sum_{x=S-km+1}^{\infty} x f(x, \lambda kt_p) - \sum_{x=S-km+1}^{\infty} (S - km) f(x, \lambda kt_p) \\ &= \lambda kt_p - \sum_{x=0}^{S-km} x f(x, \lambda kt_p) - (S - km) \left[1 - \sum_{x=0}^{S-km} f(x, \lambda kt_p) \right] \end{aligned} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

بنابراین متوسط هزینه سفارش اضطراری در واحد زمان از رابطه ۱۲ به دست می‌آید.

$$C_o^e = \frac{C_e}{kt_p} \left(\lambda kt_p - \sum_{x=0}^{S-km} x f(x, \lambda kt_p) - (S - km) \left[1 - \sum_{x=0}^{S-km} f(x, \lambda kt_p) \right] \right) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

متوسط هزینه نت (C_m)

زمان بهینه تعویض پیشگیرانه (t_p) با توجه به عمر دستگاه باید محاسبه شود. هرگاه خرابی اتفاق بیفتد هزینه تعویض (C_f) انجام می‌شود ولی اگر خرابی اتفاق نیفتد در زمان برآورد شده t_p ماشین تعمیرات پیشگیرانه خواهد داشت و هزینه (C_p) لحاظ

می شود. احتمال اینکه ماشین در طول دوره تعمیرات پیشگیرانه (t_p) خراب نشود را با تابع تابع $R(t_p)$ نشان می دهیم که بیان کننده قابلیت اطمینان جزء اصلی (بحرانی) دستگاه به ازای طول دوره تعمیرات پیشگیرانه (t_p) است. مقدار قابلیت اطمینان ماشین در رابطه ۱۳ ارائه شده است.

$$R(t_p) = e^{-\lambda t_p} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

برای تعیین متوسط هزینه های نت در واحد زمان، هزینه های نت در فاصله بین دو تعمیر متوالی را محاسبه کرده و بر متوسط زمان بین دو تعمیر متوالی تقسیم می کنیم. بر اساس مفروضات بیان شده، در انتهای همه دوره های تعمیر پیشگیرانه، عملیات تعمیر صورت می پذیرد. پس از انجام تعمیر، در صورتی که ماشین دچار خرابی نشود، تعمیر بعدی بعد از گذشت زمان t_p (در انتهای دوره بعدی) رخ می دهد. در غیر این صورت، تعمیر بعدی در حین دوره و بر اثر خرابی ماشین انجام می شود. بر این اساس رابطه ۱۴ متوسط زمان بین دو تعمیر متوالی را نشان می دهد.

$$t_p R(t_p) + \int_{-\infty}^{t_p} t f(t) \cdot dt = \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_p}) \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

متوسط هزینه در فاصله بین دو تعمیر متوالی نیز با توجه به احتمال انجام تعمیر پیشگیرانه و تعمیر به دلیل خرابی، بر اساس رابطه ۱۵ محاسبه می شود.

$$C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)] = c_p \cdot e^{-\lambda t_p} + C_f (1 - e^{-\lambda t_p}) \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

بنابراین، متوسط هزینه نت در واحد زمان از طریق رابطه ۱۶ به دست می آید (جوهن و همکاران^{۲۰}):

$$C_m = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + \int_{-\infty}^{t_p} t f(t) \cdot dt} = \frac{c_p \cdot e^{-\lambda t_p} + C_f (1 - e^{-\lambda t_p})}{\frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_p})} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

با توجه به محاسبه اجزای هزینه، مدل سازی نهایی مسئله توسط روابط ۱۷ تا ۲۰ نشان داده می شود. تابع هدف مینیمم کردن هزینه برای تعیین متغیرهای S ، k و t_p است که در صورت تعیین مقادیر آنها، مقدار تابع هدف (TC) در کمترین مقدار خود قرار خواهد داشت.

$$\begin{aligned} \text{Min } TC = & \frac{h}{2} \left[\sum_{x=0}^S (S-x) f(x, \lambda L) \right. \\ & \left. + \sum_{x=0}^{S-km} (S-km-x) f(x, \lambda(kt_p + L)) \right] + \frac{R}{kt_p} \\ & + \frac{C_e}{kt_p} [\lambda kt_p - \sum_{x=0}^{S-km} x f(x, \lambda kt_p)] - (S-km) \left[1 - \sum_{x=0}^{S-km} f(x, \lambda kt_p) \right] \\ & + \frac{C_p \cdot e^{-\lambda t_p} + C_f (1 - e^{-\lambda t_p})}{\frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_p})} \end{aligned} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

S.t.

$$S \geq km \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

$$t_p \geq 0 \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

اعداد صحیح $S, k \geq 0$

(رابطه ۲۰)

رابطه ۱۸ تضمین می‌کند که حداکثر موقعیت موجودی برای انجام تعمیرات پیشگیرانه کافی باشد. روابط ۱۹ و ۲۰ نیز نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کند.

در این بخش به منظور دستیابی به اهداف پژوهش و نشان دادن کاربردی بودن مدل، مراحل پیاده‌سازی مدل در یک شرکت خودرو ساز به منظور اجرای برنامه ریزی نت ماشین‌آلات تشریح می‌شود. مراحل اجرای پژوهش در مطالعه موردی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل شماره (۲): مراحل انجام تحقیق

در مرحله اول با توجه به محدودیت‌های موجود از قبیل منابع مالی و زمانی و همچنین با توجه به نقاط قوت از قبیل تجربه کاری در بخش کنترل و برنامه‌ریزی قطعات یدکی غیر تولیدی شرکت‌های خودروسازی اقدام به انتخاب محیط تحقیق گردید و سپس از بخش سالن‌های پیش‌رنگ خودرو اقدام به بررسی خطوط مختلف تولید شد. که در نهایت مجموعه ماشین‌آلات شاتل رنگ به دلیل حساسیت عملکرد و گلوگاهی بودن بین سالن‌های بدنه سازی و رنگ انتخاب شد.

در مرحله دوم تحقیق با بررسی اسناد و پارت لیست قطعات ربات شاتل همچنین استخراج پریود زمانی هر تعویض، مقدار روند مصرف هر قطعه در هر سال و شرح خرابی‌ها و پیشینه شکست‌های تصادفی و داده‌های تاریخی مربوط به تعداد خرابی در یک سال گذشته استخراج شد و با استفاده از آزمون نیکویی برازش در نرم افزار Minitab در سطح اطمینان ۹۵٪ توزیع تعداد خرابی در واحد زمان متناسب با توزیع پواسون تشخیص داده شد. همچنین با بررسی سوابق درخواست خرید قطعات یدکی شاتل و شناخت از وضعیت صدور سفارش‌های عادی و اضطراری قطعات یدکی و مصاحبه حضوری با پرسنل تعمیرات ربات شاتل و خبرگان این تجهیز که سالهاست نت شاتل را در دست دارند (متشکل از ۲ کارشناس برق و مکانیک و ۸ تکنسین برق و مکانیک) اقدام به بررسی وضعیت موجود در شاتل پیش‌رنگ از نظر موقعیت سطح موجودی با توجه به تعداد فعال قطعات در ربات شاتل و برنامه‌های نت گردید.

در مرحله سوم با توجه به خط مشی‌های از پیش تعیین شده و نیازها و انتظارات مدیران تولید و تعمیرات حاضر در جلسات و بررسی توقفات ناشی از عدم وجود قطعه در زمان بروز شکست‌ها، نیاز به مدلی بود تا بتواند در ربات شاتل به طور هم‌زمان برنامه‌ریزی نت و کنترل موجودی قطعات یدکی را انجام دهد. در مرحله چهارم با توجه به مدل انتخابی اقدام به بررسی محدودیت‌های تحقیق گردید. ربات شاتل پیش‌رنگ ایران خودرو در مجموع دارای ۲۲۰ قطعه می‌باشد که برنامه ریزی هم‌زمان برای همگی آنها بسیار پیچیده می‌باشد. بنابراین باید روی قطعات مهم تر تمرکز شود. در مرحله پنجم داده‌های مورد نیاز از شرکت خودرو ساز جمع‌آوری شده است. پارامترهایی که در مدل مورد نیاز است و مقادیر آنها به سادگی در دسترس نیست می‌بایست با توجه به داده‌های جمع‌آور شده دیگر محاسبه گردد. بدلیل تعداد زیاد قطعات ربات شاتل و پیچیدگی‌های مدل سازی هم‌زمان چندین قطعه نامتجانس، ابتدا قطعات دستگاه بررسی شده و اولویت بندی می‌شود. با استفاده از استخراج اطلاعات مربوط به هر

قطعه از سیستم نت شرکت خودرو ساز از قبیل تعداد فعال هر قطعه در ماشین شاتل و میزان روند مصرف طی ۵ سال گذشته و سوابق درخواست خرید، قیمت قطعات، مدت زمان از لحظه سفارش تا زمان تحویل، میزان توقفات مندرج در سوابق ماشین و نیز تاثیر شکست بر دیگر قطعات و آسیب کلی به ربات شاتل، و بر اساس قضاوت های تیم نت اولویت بندی قطعات انجام شد. تیم نت شاتل متشکل از کارشناسان برق و مکانیک و تکنسین های نت با اولویت بندی بر اساس شاخص های بیان شده و خرابی که منجر به توقف طولانی خط تولید میشود و مقایسه با قطعات دیگر یک قطعه را به عنوان قطعه بحرانی تعیین کردند. در مرحله ششم به ترتیبی که در ذیل به آن پرداخته می شود به تجزیه و تحلیل داده ها و حل مدل پرداخته می شود و در نهایت تحلیل حساسیت انجام می شود. براساس ویژگی های ربات شاتل، این ماشین به عنوان یک سیستم با چند جزء مشابه در نظر گرفته شده است. پارامترهای تابع توزیع خرابی قطعه بحرانی انتخاب شده با استفاده از داده های جمع آوری شده، تعیین شد. در این مدل هدف تعیین مقادیر بهینه پارامترهای S و k است به گونه ای که TC مینیمم هزینه (کمترین مقدار) را داشته باشد. پارامترهای ورودی در جدول ۴ فهرست شده اند.

جدول شماره (۴): مقادیر پارامترهای ورودی مسئله

متغیرها ورودی		
h	۳۵۰,۰۰۰	هزینه نگهداری به ازای هر قطعه در هر واحد زمان
λ	۰/۱۲۷	نرخ خرابی هر قطعه
M	۱	تعداد اجزای ماشین
L	۲۶	مدت زمان تأمین قطعات یدکی از زمان ثبت سفارش
C_p	۱۶۶,۳۰۰	هزینه خدمات تعمیرات پیشگیرانه
R	۳,۰۰۰,۰۰۰	هزینه صدور سفارش ثابت
C_e	۱,۵۰۰,۰۰۰	هزینه صدور سفارش اضطراری
C_f	۴۳,۰۰۰,۰۰۰	هزینه تعویض قطعات معیوب

پس از حل مدل، مقادیر بهینه متغیرها و تابع هدف تعیین شده اند که در جدول ۵ نمایش داده شده است. برای سیستم مقدار سفارش قطعات یدکی باید تا ۲ عدد در هر سفارش افزایش یابد. فاصله زمانی تا تعمیرات پیشگیرانه بعدی مقدار ۲۶ هفته است و مقدار نسبت فاصله زمانی سفارش و فاصله زمانی تا تعمیرات پیشگیرانه بعدی ($k=1$) تعیین شده است. در نتیجه فاصله زمانی سفارش t_0 برابر ۲۶ هفته می شود. در نهایت هزینه کل نت برابر ۳۸۴۹۶۰۰۰ در هفته می شود.

جدول شماره (۵): مقادیر بهینه برای متغیرها

جواب های بهینه		
S^*	۲	حداکثر یا بیشینه موجودی قطعات یدکی
K^*	۱	نسبت بین فاصله سفارش تا زمان تعمیرات پیشگیرانه
t_p^*	۲۶	فاصله زمانی بین دو تعمیرات پیشگیرانه
TC^*	۳۸۴۹۶۰۰۰	مجموع هزینه های کل نت

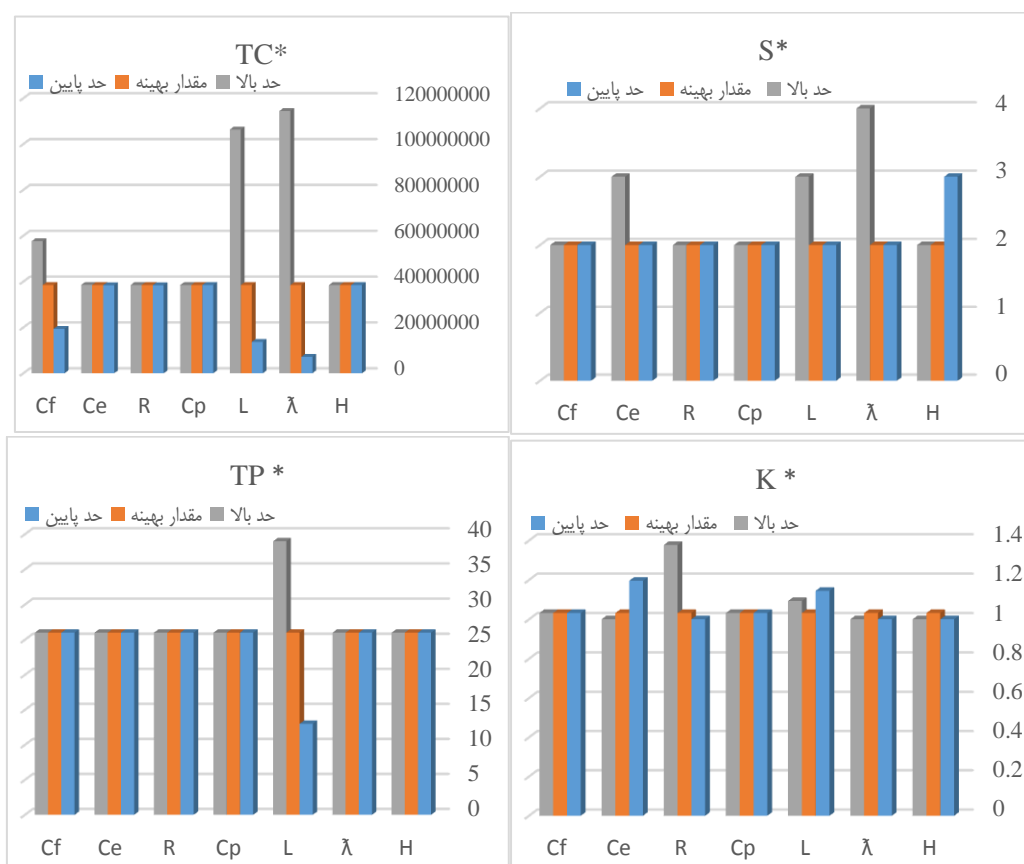
تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی به منظور بررسی واکنش مدل انجام شده است. در این راستا در حل مدل با افزایش ۵۰ درصدی و کاهش ۵۰ درصدی در مقادیر هر یک از پارامترهای ورودی و ثابت نگه داشتن مقادیر دیگر پارامترها در سناریوی اول و پایه مقادیر بهینه پس از حل مدل استخراج شده و نتایج این آنالیز حساسیت به صورت مقایسه ای در جدول ۶ خلاصه شده است. همچنین رنج تغییرات کوچکتر پارامترها نیز انجام شده و در جدول ۷ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه در عمل پارامترهای مدل برآورد می شود، تحلیل حساسیت متغیرهای مدل نسبت به پارامترها انجام می شود تا مشخص شود که در صورت بروز درصدی خطا در برآورد پارامترها، متغیرهای مدل چه میزان تحت تاثیر قرار می گیرند. در این خصوص مشابه مقاله سادیکو و همکاران (۲۰۱۸) رنج تغییرات ۵۰٪ و ۲۵٪ برای تغییر پارامترها لحاظ شده است. تحلیل حساسیت منجر به این میشود که در مطالعه موردی فوق آستانه تغییر متغیرهای تصمیم مورد بررسی دقیقتر قرار گیرد. تحلیل حساسیت برای مقادیر به دست آمده در تحقیق حاضر به شرح جدول ۶ و ۷ است.

جدول شماره (۶): تحلیل حساسیت برای مقادیر به دست آمده در تحقیق حاضر

ورودی	تجزیه و تحلیل حساسیت به ازای تغییر ۵۰٪				
	TC*	t_p^*	S*	K*	پارامترهای مدل
	هفته	عدد	هفته		
H	۱۷۵۰۰۰	۳۸۴۶۳۰۰۰	۲۶	۳	۳۵۰۰۰۰
	۵۲۵۰۰۰	۳۸۵۱۴۰۰۰	۲۶	۲	
λ	۰،۰۶۳۵	۷۱۷۸۱۰۰	۲۶	۲	۰،۱۲۷
	۰،۱۹۰۵	۱۱۴۴۵۰۰۰۰	۲۶	۴	
L	۱۳	۱۳۷۲۳۰۰۰	۱۳	۲	۲۶
	۳۹	۱۰۶۳۳۰۰۰۰	۳۹	۳	
C_p	۸۳۱۵۰	۳۸۴۹۴۰۰۰	۲۶	۲	۱۶۶۳۰۰
	۲۴۹۴۵۰	۳۸۴۹۹۰۰۰	۲۶	۲	
R	۱۵۰۰۰۰۰	۳۸۴۳۹۰۰۰	۲۶	۲	۳۰۰۰۰۰۰
	۴۵۰۰۰۰۰	۳۸۵۴۴۰۰۰	۲۶	۲	
C_e	۷۵۰۰۰۰	۳۸۴۲۶۰۰۰	۲۶	۲	۱۵۰۰۰۰۰
	۲۲۵۰۰۰۰	۳۸۵۵۶۰۰۰	۲۶	۳	
C_f	۲۱۵۰۰۰۰۰	۱۹۳۹۳۰۰۰	۲۶	۲	۴۳۰۰۰۰۰۰
	۶۴۵۰۰۰۰۰	۵۷۵۹۹۰۰۰	۲۶	۲	

جدول شماره (۷): تحلیل حساسیت برای مقادیر به دست آمده در تحقیق حاضر

ورودی	تجزیه و تحلیل حساسیت به ازای تغییر ۲۵٪				
	TC*	t_p^*	S*	K*	پارامترهای مدل
	هفته	عدد	هفته		
H	۲۶۲۵۰۰	۳۸۴۸۶۰۰۰	۲۶	۲	۳۵۰۰۰۰
	۴۳۷۵۰۰	۳۸۵۰۵۰۰۰	۲۶	۲	
λ	۰،۰۹۵۲۵	۱۷۵۵۲۰۰۰	۲۶	۲	۰،۱۲۷
	۰،۱۵۸۷۵	۷۳۵۰۶۰۰۰	۲۶	۲	
L	۱۹،۵	۲۲۶۵۵۰۰۰	۱۹،۵	۲	۲۶
	۳۲،۵	۶۵۲۴۲۰۰۰	۳۲	۲	
C_p	۱۲۴۷۲۵	۳۸۴۹۵۰۰۰	۲۶	۲	۱۶۶۳۰۰
	۲۰۷۸۷۵	۳۸۴۹۸۰۰۰	۲۶	۲	
R	۲۲۵۰۰۰۰	۳۸۴۶۸۰۰۰	۲۶	۲	۳۰۰۰۰۰۰
	۳۷۵۰۰۰۰	۳۸۵۲۲۰۰۰	۲۶	۲	
C_e	۱۱۲۵۰۰۰	۳۸۴۶۲۰۰۰	۲۶	۲	۱۵۰۰۰۰۰
	۱۸۷۵۰۰۰	۳۸۵۳۰۰۰۰	۲۶	۲	
C_f	۳۲۲۵۰۰۰۰	۲۸۹۴۵۰۰۰	۲۶	۲	۴۳۰۰۰۰۰۰
	۵۳۷۵۰۰۰۰	۴۸۰۴۸۰۰۰	۲۶	۲	



شکل شماره (۳): نتایج تحلیل حساسیت در مقادیر ورودی

پس از حل مدل جواب‌های بهینه به دست آمد و خروجی‌های نرم‌افزار در حالات مختلف تحلیل حساسیت گردید که در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج بررسی نشان داد که افزایش و کاهش در هزینه نگهداری به ازای هر قطعه در واحد زمان تغییر قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های کل نسبت به قبل ایجاد نمی‌کند ولی انتظار می‌رود با کاهش هزینه‌های نگهداری موجودی بیشتری را بتوان نگهداری کرد. همچنین با بررسی آنالیز حساسیت در بخش نرخ خرابی می‌بینیم با کاهش نرخ خرابی هر قطعه کاهش چشمگیری در هزینه‌های کل ایجاد می‌شود و با افزایش نرخ خرابی شاهد افزایش بسیار زیادی در هزینه‌های کل نت خواهیم شد. از پارامترهای مهم و قابل توجه در آنالیز حساسیت می‌توان مدت زمان تأمین قطعات یدکی از زمان ثبت سفارش را نام برد زیرا با تغییر در بازه زمانی فوق که به آن لید تایم تأمین قطعه نیز می‌گویند افزایش و کاهش قابل توجهی در زمان بهینه تعویض پیشگیرانه و هزینه کل نت خواهیم داشت. با تغییر در هزینه خدمات تعمیرات پیشگیرانه در آنالیز حساسیت متوجه می‌شویم که تأثیر بسیار کمی در هزینه‌های کل نت و دیگر متغیرهای تصمیم ایجاد می‌کند. همچنین هزینه‌های ثابت صدور سفارش عادی و هزینه‌های صدور سفارش اضطراری نیز تأثیر چندانی در تعیین سیاست حفظ و نگهداری قطعات یدکی ندارد. و اما هزینه‌های خدمات تعمیرات برای تعویض قطعات معیوب ارتباط مستقیمی با هزینه کل نت دارد به این دلیل که بخش قابل توجهی از هزینه‌های کل بهای تمام‌شده مربوط به قطعه یدکی است.

۳- بحث و نتایج

در این تحقیق یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی هزینه نهایی نت و موجودی قطعات یدکی در یک ماشین با چند جزء مشابه ارائه شد. برای این منظور یک تابع هزینه در نظر گرفته شده و فرض شد که زمان ورود شکست‌ها بر اساس فرآیند پواسون با نرخ شکست ثابت است. همچنین خرابی‌های دستگاه غیرقابل تعمیر فرض شده است. سیاست سفارش در سیستم دوره ثابت است و در نهایت مجموع هزینه‌های کل نت از قبیل هزینه سفارش دوره ای و اضطراری و هزینه‌های امور بازرسی و تعمیرات در مدل سازی کمینه شده است. همچنین زمان بهینه تعویض پیشگیرانه در مدل پیشنهادی تعیین می‌شود. برای نشان دادن توانمندی و

کارایی مدل نتایج مطالعه موردی در خطوط پیش رنگ یک شرکت خودروسازی برای تعیین سیاست‌های مدیریت موجودی قطعات پرمصرف و بحرانی پیاده‌سازی شده است. همچنین به منظور تحلیل پایداری نتایج تحقیق، حساسیت نتایج به تغییرات پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفت. جمع‌بندی نهایی از تحلیل حساسیت با تغییر در پارامترهای ورودی نشان می‌دهد که:

- هزینه کل نت (TC) به نرخ خرابی، مدت‌زمان تأمین قطعه و هزینه تعویض قطعات معیوب حساس است، به طوری که با افزایش و کاهش در مقادیر این پارامترها ارتباط مستقیم دارد. هزینه کل نت نسبت به تغییرات مقادیر نرخ خرابی و مدت‌زمان تأمین قطعه حساسیت بالاتری دارد.
- حداکثر موقعیت موجودی (S) با کاهش در هزینه نگهداری به ازای هر قطعه افزایش پیدا می‌کند و با افزایش هر کدام از پارامترها (از قبیل نرخ خرابی، مدت‌زمان تأمین قطعه و هزینه صدور سفارش اضطراری) سطح موجودی افزایش پیدا می‌کند. در مجموع می‌توان گفت که سطح موجودی نسبت به افزایش نرخ خرابی حساس‌تر است.
- نسبت زمان سفارش به زمان تعویض پیشگیرانه (k) به تغییرات هزینه صدور سفارش ثابت و اضطراری حساس است. به ترتیبی که با کاهش در هزینه صدور سفارش اضطراری و افزایش در هزینه صدور سفارش عادی مقدار k افزایش پیدا می‌کند.

برای تحقیقات آینده، توصیه می‌شود که انواع مختلف شکست‌ها مورد توجه قرار گیرد. همچنین، در تحقیق حاضر ما تابع هزینه را بدون در نظر داشتن دسترسی به سیستم مورد بررسی قراردادیم. در دسترس بودن سیستم در توسعه سیاست‌های نت و موجودی قطعات یدکی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. همچنین در حالتی که چند جزء غیر متجانس در ماشین وجود داشته باشد باید اثرات خرابی آنها بر یکدیگر و همچنین نرخ‌های مصرف متفاوت آنها بررسی شده و زمان‌های نت آنها هماهنگ شود.

۴- منابع

1. Baharestan, O., & Golshan Tafti, O. (2016). Spare parts inventory control. *International Management and Accounting Conference*.
2. Barlow, R.E. & Proschan F. (1965). *Mathematical theory of Reliability*. New York: Wiley.
3. Chiang, C., & Gutierrez, G.J. (1996). A periodic review inventory system with two supply modes. *European Journal of Operational Research*, 94(3), 527-547.
4. Cox, D.R., (1962). *Renewal theory (Vol. 1)*. London: Methuen.
5. Heidari, E. (2016) Optimization of inventory control costs and process quality by taking into account statistical indicators and optimal maintenance policy. Master Degree thesis. (*in persian*)
6. Keizer, M.C.A.O., Teunter, R.H., & Veldman, J. (2017). Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components. *European Journal of Operational Research* 257(1), 209-222.
7. Keizer, M.C.O., Teunter, R.H., Veldman, J., & Babai, M.Z. (2018). Conditionbased maintenance for systems with economic dependence and load sharing, *International Journal of Production Economics*, 195, 319-327.
8. Kilpi, J., Töyli, J., & Vepsäläinen, A. (2009). Cooperative strategies for the availability service of repairable aircraft components. *International Journal of Production Economics*, 117(2), 360-370.
9. Panagiotidou, S., (2014). Joint optimization of spare parts ordering and maintenance policies for multiple identical items subject to silent failures. *European Journal of Operational Research* 235, 300-314
10. Saedi Sogh, Y., Ahmadi, A., & Ramazani, S. (2015). Optimization of the combination of inventory of spare parts and maintenance activities. *Supply Chain Management*. 17 (49) (*in persian*)

11. Taslimi, E., Nekoei, M., & Kavosh, S. (2010). Provide an optimal method for ordering spare parts in Mobarakeh Steel Complex. 7th International Industrial Engineering Conference. (in persian)
12. Siddique, P. J., Luong, H. T., & Shafiq, M. (2018). An optimal joint maintenance and spare parts inventory model. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 29(2), 177-192.
13. Valmohammadi, C., Sufi Abadi, J., & Lotfzadeh, F., Paizi (2017), Choosing Maintenance Strategy to Improve Reliability and Reliability Measurement Indices. *Journal of Productivity Management (beyond Management)*, 11(2), 175-196.
14. Wang, W., & Syntetos A. (2011). Spare parts demand: linking forecasting to equipment maintenance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 1194-1209.
15. Wang, W. (2012). A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimisation. *European Journal of Operational Research*, 216(1), 127-139.
16. Zahedi-Hosseini, F., Scarf, P., & Syntetos, A. (2017). Joint optimisation of inspection maintenance and spare parts provisioning: a comparative study of inventory policies using simulation and survey data. *Reliability Engineering & System Safety*, 168, 306-316.
17. Zahedi-Hosseini, F., Scarfb, P., & Syntetosc, A. (2018). Joint maintenance-inventory optimisation of parallel production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 73-86.
18. Zhang, X., & Zeng, J. (2017). Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems, *European Journal of Operational Research*, 262(2), 479-498.

Joint Maintenance and Spare Parts Inventory Planning (Case Study : Pre – Paint Shuttle Robot of an Automotive Company)

Seyed Mohamadreza Aboalaghaey

Department of Industrial Engineering, Electronic Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Davood Mohammaditabar (Corresponding Author)

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Email: d_mohammaditabar@azad.ac.ir

Sadigh Raissi

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Carrying out maintenance planning for machine tools is one of the critical factors in reducing operating costs. Inventory management is a key element on the performance of the maintenance policy. Through current research, an integrated inventory control of spare parts and maintenance scheduling is proposed to determine the maximum inventory level as well replenishment cycle (S,T), along with the determination of the optimal preventive maintenance period. The total cost associated with the maintenance system, such as the cost of periodical and emergency orders and the costs of inspections and repairs are minimized via the model objective function. To illustrate the capability and performance of the model, the results of applying the model into a case study is reported in an automotive pre-paint line for determining inventory control policies of a critical item. In addition, in order to analyze the stability of the results, the sensitivity of the variables to the changes in input parameters has been investigated. Based on the results, the total cost is affected by the failure rate, the lead time period, and the cost of replacing defective items. In this regard, the system is more sensitive to failure rate and the lead time. In the case of constant failure rates, applying the proposed method might be successful.

Keywords: Inventory Control, Maintenance Scheduling, Poisson Process, Reliability Centered Maintenance (RCM), Spare Parts.