فصلنامه مدیریت صنعتی دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد سنندج – سال چهاردهم/ شماره ۴۹ / پاییز ۱۳۹۸

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 مسؤول)
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

برنامه ریزی 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 می شود. مجموع هزینه‌های مرتبط با نظام نت، نظیر هزینه سفارش دوره¬ای و اضطراری و هزینه‌های امور بازرسی و تعمیرات در تابع هدف مدل کمینه می شوند. برای نشان دادن توانمندی و کارایی مدل، نتایج مطالعه موردی در خطوط پیش رنگ یک شرکت خودروسازی برای تعیین سیاست‌های مدیریت موجودی قطعه ای پرمصرف و بحرانی پیاده‌سازی شده¬است. همچنین به‌منظور تحلیل پایداری نتایج تحقیق، حساسیت نتایج به تغییرات پارامترهای ورودی بررسی شده¬است. براساس نتایج، هزینه کل متاثر 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 نسبتا 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 آن ها 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 می دهد (کیلپی[1] و همکاران، ۲۰۰۹).

یک سیستم کنترل موجودی کارا به‌منظور تأمین قطعات مورد نیاز آتی نیازمند اطلاعات مربوط به پیش‌بینی میزان کل تقاضا، برآورد تابع توزیع تقاضا در فاصله زمانی تحویل و دسته‌بندی قطعات به‌منظور ارائه مدل متناسب با هر دسته است (تسلیمی[2] و همکاران، ۱۳۸۹). سعیدی سوق[3] و همکاران (۱۳۹۴) از شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌منظور بهینه‌سازی ترکیبی فعالیت‌های نت مبتنی بر وضعیت موجودی قطعات یدکی استفاده کردند. حیدری[4] (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[5] (۱۳۹۵) بیان داشتند که کنترل موجودی قطعات یدکی برای بسیاری از سازمان‌ها ضروری است و یک متدلوژی برای کنترل موجودی قطعات یدکی پیشنهاد کردند. این متد بر اساس طبقه‌بندی و دسته‌بندی قطعات یدکی در گروه‌هایی با ویژگی‌های مشابه استوار است.

والمحمدی[6] و همکاران (۱۳۹۶) به انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیرات به منظور بهبود شاخص‌های ارزیابی قابلیت اطمینان و تعمیر پذیری پرداختند. پاناگیوتیدون[7] (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[8] (۲۰۱۷) به تصمیم گیری هم زمان نگهداری و تعمیرات و سفارش دهی قطعات یدکی در یک سیستم چند جزئی پرداختند. آنها نتیجه گیری کردند که برخلاف سیستم تک جزئی که یک زمان بهینه برای بازرسی و اندازه بهینه برای حداکثر موقعیت موجودی تعیین می شود، در حالت چند جزئی باید تعیین این مقادیر مبتنی بر حالت سیستم باشد. به بیان دیگر بر اساس وضعیت اجزا، موقعیت موجودی قطعات یدکی و زمان مورد انتظار برای دریافت سفارش های در راه، تصمیمات موجودی و نگهداری و تعمیرات اتخاذ می شود.

کایزر و همکاران[9] (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. درنتیجه جلوگیری از خراب شدن سریع از یک‌سو 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[10] 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 [11] (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[12] و همکاران (۲۰۱۸) بیان داشتند که نگهداری بهینه ماشین‌آلات 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 هردو حالت قابل تعمیر و غیر قابل تعمیر مورد بررسی قرار گرفت.

جدول شماره (۱): جدول شکاف تحقیقاتی

مراجع / سال	کنترل موجودی قطعات یدکی	تعیین زمان بهینه تعویض پیشگیرانه	حداقل کردن هزینه نهایی نت	سیستم چند جزئی	مطالعه موردی
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 درزمینه 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 سادیکو و همکاران (۲۰۱۸) نزدیک ترین مقاله با تحقیق حاضر است. از تفاوت های اصلی این تحقیق و مقاله سادیکو 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 پوآسون با نرخ شکست ثابت است و خرابی‌های دستگاه غیرقابل تعمیر بوده و درصورت خرابی قطعه تعویض می شود. تابع هدف مدل شامل هزینه نگهداری، هزینه سفارش منظم، هزینه سفارش اضطراری و هزینه نگهداری سیستم نت است. به‌منظور رسیدن به اهداف تحقیق جاری، بایستی زمان بهینه تعویض پیشگیرانه با توجه به باقی‌مانده عمر دستگاه تعیین شود. هرگاه خرابی اتفاق بیفتد هزینه تعویض به دلیل خرابی پرداخت می‌شود؛ ولی اگر خرابی اتفاق نیفتد، در زمان برنامه ریزی شده ماشین تعمیرات پیشگیرانه انجام می‌شود و هزینه تعویض پیشگیرانه پرداخت می شود. بنابراین ماشین به دو دلیل عمده زیر از مدار خارج می‌شود:

۱. ازکارافتادگی قطعات اصلی که موجب توقف دستگاه می‌شود
۲. نت پیشگیرانه در زمان سرویس دوره‌ای

عدم پیش‌بینی مناسب برای تأمین قطعات یدکی و مصادف شدن کمبود این قطعات با زمان تعمیرات موجب به وجود آمدن هزینه‌هایی 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 مورداستفاده قرار می‌گیرد به شرح زیر است:

۱. عملیات تعویض در سیستم موجب بهینه‌سازی و قابلیت استفاده تجهیز در حالت اولین استفاده می‌شود[۱۳].
۲. زمان موردنیاز برای انجام سرویس‌های دوره‌ای یا هرگونه عملیات تعویض قطعات سیستم در مقایسه با زمان فرآیند ناچیز و قابل‌اغماض است.
۳. شکست‌ها در سیستم از توزیع پوآسون پیروی می‌کند. در این صورت تابع جرم احتمال تعداد شکست‌ها در t واحد زمان به‌صورت 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_o)، به‌صورت مضربی صحیح از مدت‌زمان سرویس دوره‌ای (t_P) فرض می شود. در این صورت خواهیم داشت:

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

۵. مدت‌زمان تأمین قطعات سفارش داده‌شده یا به‌عبارت‌دیگر زمان تدارک (L)[۱۴] کمتر از مدت‌زمان تعمیرات و زمان بررسی سطح موجودی است $(L < t_p \leq t_o)$
۶. مدت‌زمان تحویل سفارش برای حالت اضطراری قابل‌اغماض است.
۷. هزینه بروز شکست در سیستم (C_f) بسیار بیشتر از هزینه نت سیستم (C_p) است $(C_f > C_p)$

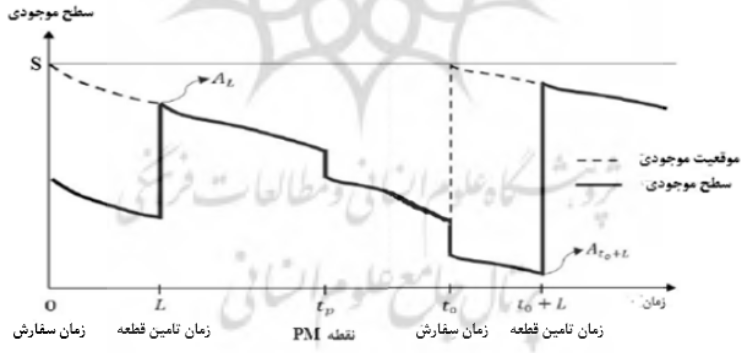
[13] As-Good-As New
[14] Regular inventory lead time

معمولاً فرض ۱ در ادبیات نت مورداستفاده قرار می‌گیرد که مبتنی بر نظریه نوسازی کوکس است (کوکس[15]،۱۹۶۲). پیش‌فرض ۲ برگرفته از تحقیق بارلو و پروسچان[16] (۱۹۶۵) حاصل می‌شود که زمان جایگزینی در مقایسه با دوره‌های بررسی، می‌تواند نادیده گرفته شود. با توجه به سفارش های 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 مورداستفاده قرار می‌گیرد (وانگ[17]، 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)[18] مورداستفاده قرار می‌گیرد. فرضیه ۶ یک دیدگاه رایج در صنعت است که هزینه‌های خرابی ناخواسته بیشتر از جایگزینی پیشگیرانه برنامه‌ریزی‌شده است.

ازآنجاکه 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. ازاین‌رو 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) می پردازیم.

ب) سیستم دوره سفارش (S,T)

در سیستم کنترل موجودی بر اساس دوره سفارش که به سیستم دوره ثابت سفارش[19] معروف است، در زمان‌های ثابت و مشخص (مثلاً هر هفته، هرماه و یا هرچند 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 داده‌شده 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 بررسی‌شده و به مقداری سفارش داده می شود 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:

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

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 می پردازیم. 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_o	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
$k=\frac{t_o}{t_p}$	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 می شود. 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 می شود. لازم به ذکر است نحوه محاسبه هزینه های کلاسیک موجودی در حالتی که نرخ مصرف قطعات بر اساس فرایند پواسون بوده را می توان در مقاله سادیکو و همکاران (۲۰۱۸) نیز مشاهده کرد. در مدل‌سازی 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 می شود.

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

متوسط سطح موجودی درست قبل از دریافت سفارش $(A_{t_{o+L}})$ بر اساس روابط زیر محاسبه می شود.

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

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

بنابراین متوسط سطح موجودی بر اساس رابطه ۸ محاسبه می شود:

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

ازاین‌رو، متوسط هزینه نگهداری مورد انتظار در واحد زمان (C_h) به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود.

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

د) متوسط هزینه سفارش منظم $(\mathrm{C_o^r})$

قطعات در ابتدای هر چرخه موجودی سفارش داده می‌شود. متوسط هزینه سفارش در واحد زمان به‌صورت رابطه ۱۰ نمـایش 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 می شود.

$$[D(t_o) + km - S]^+ = \sum_{x=S-km+1}^{\infty} (x + km - S) f(x, \lambda kt_p)$$
$$= \sum_{x=S-km+1}^{\infty} x f\big(x.\lambda kt_p\big) - \sum_{x=S-km+1}^{\infty} (S - km) f\big(x.\lambda kt_p\big) \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$
$$= \lambda kt_p - \sum_{x=0}^{S-km} x f\big(x, \lambda kt_p\ \big) - (S - km)[1 - \sum_{x=0}^{S-km} f(x, \lambda kt_p)]$$

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

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

متوسط هزینه نت (C_m)

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

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.

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

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، درصورتی 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.

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

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.

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

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

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

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.

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

S.t.

$$S \geq km \qquad \text{(رابطه ۱۸)}$$

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

[20] John et al

$S, k \geq 0$ اعداد صحیح (رابطه ۲۰)

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

در این بخش به منظور دستیابی به اهداف پژوهش و نشان دادن کاربردی بودن مدل، مراحل پیاده سازی مدل در یک شرکت خودرو ساز به منظور اجرای برنامه ریزی نت ماشین‌آلات تشریح می شود. 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 ماشین آلات 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 داده های 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 تجهیزکه 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 برنامه-ریزی نت و کنترل موجودی قطعات یدکی را انجام دهد. در مرحله چهارم با توجه به مدل انتخابی اقدام به بررسی محدودیت-های تحقیق گردید. ربات شاتل پیشرنگ ایران خودرو در مجموع دارای ۲۲۰ قطعه می‌باشد که برنامه ریزی هم زمان برای همگی آنها بسیار پیچیده می باشد. 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 داده های جمع آور شده دیگر محاسبه گردد. بدلیل تعداد زیاد قطعات ربات شاتل و پیچیدگی های مدل سازی هم زمان چندین قطعه نامتجانس، ابتدا قطعات دستگاه بررسی شده و اولویت بندی می شود. 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 ازلحظه 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 تکنسین‌های 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 می‌شود به تجزیه و تحلیل داده‌ها و حل مدل پرداخته می‌شود و در نهایت تحلیل حساسیت انجام می شود. براساس ویژگی‌های ربات شاتل، این ماشین به عنوان یک سیستم با چند جزء مشابه در نظر گرفته‌شده 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 به‌گونه‌ای که TC مینیمم هزینه (کمترین مقدار) را داشته باشد. پارامترهای ورودی در جدول ۴ فهرست شده‌اند.

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	مدت‌زمان 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 ($k= ۱$) تعیین شده است.درنتیجه فاصله زمانی سفارش t_o برابر ۲۶ هفته می‌شود. درنهایت هزینه کل نت برابر ۳۸۴۹۶۰۰۰ در هفته می‌شود.

جدول شماره(۵): مقادیر بهینه برای متغیرها

جواب‌های 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 هزینه‌های کل نت

تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی به‌منظور بررسی واکنش مدل انجام‌شده است. در این راستا در حل مدل با افزایش ۵۰ درصدی و کاهش ۵۰ درصدی در مقادیر هر یک از پارامترهای ورودی و ثابت نگه‌داشتن مقادیر دیگر پارامترها در سناریوی اول و پایه مقادیر بهینه پس از حل مدل استخراج‌شده و نتایج این آنالیز حساسیت به‌صورت مقایسه‌ای در جدول ۶ خلاصه‌شده است.

همچنین رنج تغییرات کوچکتر پارامتر ها نیز انجام شده و در جدول ۷ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه در عمل پارمترهای مدل برآورد می شود، تحلیل حساسیت متغیر های مدل نسبت به پارمتر ها انجام می شود تا مشخص شود که در صورت بروز درصدی خطا در برآورد پارمتر ها، متغیر های مدل چه میزان تحت تاثیر قرار می گیرند. در این خصوص مشابه مقاله سادیکو و همکاران (۲۰۱۸) رنج تغیرات ۵۰ ٪ و ۲۵ ٪ برای تغییر پارامتر ها 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 به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر به شرح جدول ۶ و ۷ است.

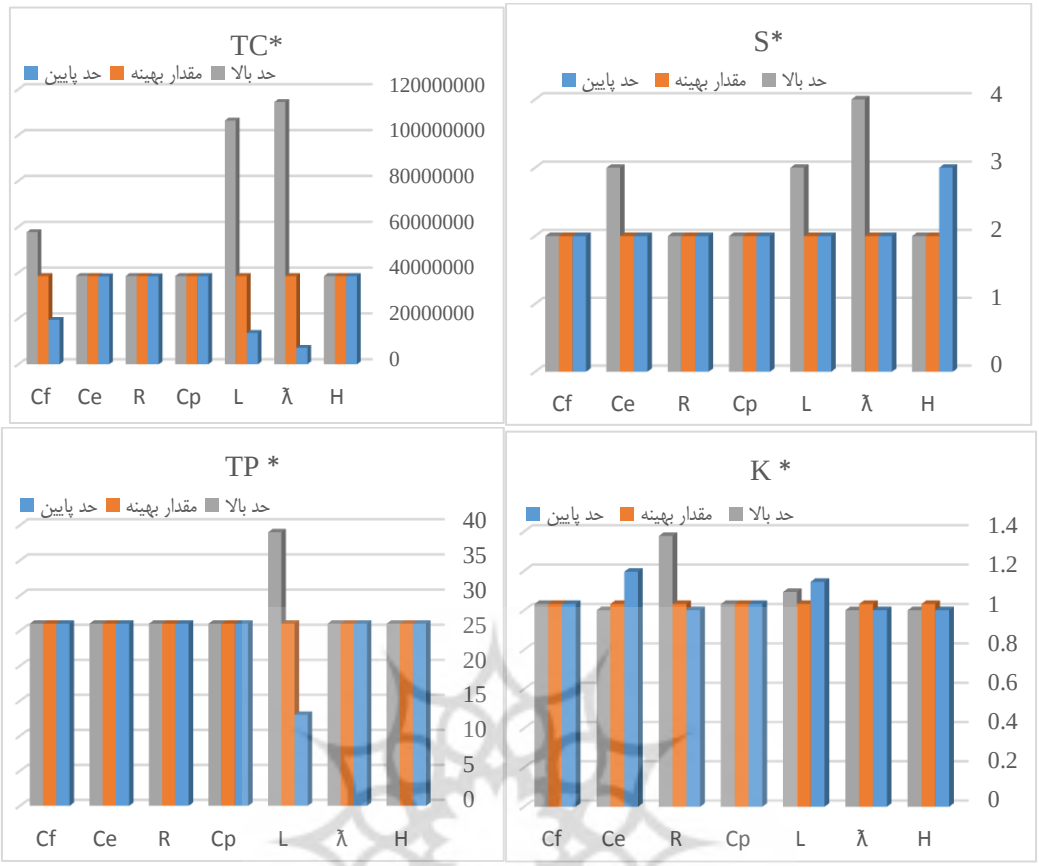
جدول شماره (۶): تحلیل حساسیت برای مقادیر به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر

تجزیه‌وتحلیل حساسیت به ازای تغییر۵۰٪						
پارامترهای مدل	K*	S* هفته	t_p^* عدد	TC* هفته		ورودی
۳۵۰۰۰۰	۱	۳	۲۶	۳۸۴۶۳۰۰۰	۱۷۵۰۰۰	H
	۱	۲	۲۶	۳۸۵۱۴۰۰۰	۵۲۵۰۰۰	
۰،۱۲۷	۱	۲	۲۶	۷۱۷۸۱۰۰	۰،۰۶۳۵	λ
	۱	۴	۲۶	۱۱۴۴۵۰۰۰۰	۰،۱۹۰۵	
۲۶	۱	۲	۱۳	۱۳۷۲۳۰۰۰	۱۳	L
	۱	۳	۳۹	۱۰۶۳۳۰۰۰۰	۳۹	
۱۶۶۳۰۰	۱	۲	۲۶	۳۸۴۹۴۰۰۰	۸۳۱۵۰	C_p
	۱	۲	۲۶	۳۸۴۹۹۰۰۰	۲۴۹۴۵۰	
۳۰۰۰۰۰۰	۱	۲	۲۶	۳۸۴۳۹۰۰۰	۱۵۰۰۰۰۰	R
	۱	۲	۲۶	۳۸۵۴۴۰۰۰	۴۵۰۰۰۰۰	
۱۵۰۰۰۰۰	۱	۲	۲۶	۳۸۴۲۶۰۰۰	۷۵۰۰۰۰	C_e
	۱	۳	۲۶	۳۸۵۵۶۰۰۰	۲۲۵۰۰۰۰	
۴۳۰۰۰۰۰۰	۱	۲	۲۶	۱۹۳۹۳۰۰۰	۲۱۵۰۰۰۰۰	C_f
	۱	۲	۲۶	۵۷۵۹۹۰۰۰	۶۴۵۰۰۰۰۰	

جدول شماره (۷):تحلیل حساسیت برای مقادیر به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر

تجزیه‌وتحلیل حساسیت به ازای تغییر ۲۵ ٪						
پارامترهای مدل	K*	S* هفته	t_p^* عدد	TC* هفته		ورودی
۳۵۰۰۰۰	۱	۲	۲۶	۳۸۴۸۶۰۰۰	۲۶۲۵۰۰	H
	۱	۲	۲۶	۳۸۵۰۵۰۰۰	۴۳۷۵۰۰	
۰،۱۲۷	۱	۲	۲۶	۱۷۵۵۲۰۰۰	۰.۰۹۵۲۵	λ
	۱	۲	۲۶	۷۳۵۰۶۰۰۰	۰.۱۵۸۷۵	
۲۶	۱	۲	۱۹.۵	۲۲۶۵۵۰۰۰	۱۹.۵	L
	۱	۲	۳۲	۶۵۲۴۲۰۰۰	۳۲.۵	
۱۶۶۳۰۰	۱	۲	۲۶	۳۸۴۹۵۰۰۰	۱۲۴۷۲۵	C_p
	۱	۲	۲۶	۳۸۴۹۸۰۰۰	۲۰۷۸۷۵	
۳۰۰۰۰۰۰	۱	۲	۲۶	۳۸۴۶۸۰۰۰	۲۲۵۰۰۰۰	R
	۱	۲	۲۶	۳۸۵۲۲۰۰۰	۳۷۵۰۰۰۰	
۱۵۰۰۰۰۰	۱	۲	۲۶	۳۸۴۶۲۰۰۰	۱۱۲۵۰۰۰	C_e
	۱	۲	۲۶	۳۸۵۳۰۰۰۰	۱۸۷۵۰۰۰	
۴۳۰۰۰۰۰۰	۱	۲	۲۶	۲۸۹۴۵۰۰۰	۳۲۲۵۰۰۰۰	C_f
	۱	۲	۲۶	۴۸۰۴۸۰۰۰	۵۳۷۵۰۰۰۰	

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



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 قابل‌توجه در آنالیز حساسیت می‌توان مدت‌زمان 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 قابل‌توجهی 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 قابل‌توجهی 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 منظوریک تابع هزینه در نظر گرفته شده و فرض شد که زمان ورود شکست‌ها بر اساس فرآیند پوآسون 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 می شود. 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 به‌منظور 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، به‌طوری‌که 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 هرکدام از پارامترها (از قبیل نرخ خرابی، مدت‌زمان تأمین قطعه و هزینه صدور سفارش اضطراری) سطح موجودی افزایش پیدا می‌کند. در مجموع می توان 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 موردتوجه قرار گیرد. همچنین، در تحقیق حاضر ما تابع هزینه را بدون در نظر داشتن دسترسی به سیستم موردبررسی قراردادیم. در دسترس بودن سیستم در توسعه سیاست‌های نت و موجودی قطعات یدکی می تواند 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 نرخ های مصرف متفاوت آنها بررسی شده و زمان های نت آنها هماهنگ شود.

٤- 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. *European Journal of Operational Research* 235, 300–314
10. Saeedi 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 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-Hosseinia, 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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی