فصلنامه علمی ° پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی ° سال چهاردهم، شماره ۴۳، زمستان ۹۵
صفحات ۷۹-۱۰۸

زمان‌بندی تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه چند هدفه فازی با استفاده از برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح

رضا علیخانی،* محمود صارمی**

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱
تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۲۲

چکیده

زمان‌بندی تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه یکی از مهمترین موضوعات در ادبیات مهندسی قابلیت اطمینان و تعمیرات سیستم می‌باشد. اهمیت این موضوع در سیستم‌های سری که با توقف یک جزء کل سیستم نیز متوقف می‌شود بیشتر مشهود است. هر چند تلاش برای زمان‌بندی دوره‌ای کارا برای همه اجزاء یک سیستم در حالی که دارای اهداف متضاد هست کار ساده‌ای به نظر نمی‌رسد. هدف از این مقاله ارائه مدل زمان‌بندی تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه برای سیستم‌های سری در بازه های زمانی متغیر و از پیش تعیین نشده و با اعمال تورم در مدل می‌باشد. اهداف مدل شامل کمینه کردن هزینه‌های از کارافتادگی، تعمیرات، جایگزینی، ثابت و بیشینه کردن قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد. مدل به مدد برنامه ریزی چند هدفه فازی و همچنین برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح طراحی شده است. همچنین مدل پیشنهادی برای یک سیستم مورد مطالعه با مثال عددی حل و ضمن تحلیل سناریوهای مختلف، به بررسی اثر تورم و نحوه اثر گذاری آن در مدل پرداخته می‌شود. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که اعمال تورم در مدل نه تنها برنامه زمانبندی برای جایگزینی و تعمیرات را با تغییر مواجه می‌کند، بلکه عمر مؤثر اجزاء را هم تحت تاثیر قرار می‌دهد.

واژگان کلیدی: *زمان‌بندی؛ تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه؛ قابلیت اطمینان؛ تورّم؛ برنامه ریزی چند هدفه فازی*

---

* کاندیدای دکترای مدیریت صنعتی، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه تهران، تهران(نویسنده مسئول) Reza.Alikhani@ut.ac.ir
** دانشیار، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران

مقدمه

در بازارهای رقابتی جهانی امروز، تولید به موقع و مقرون به صرفه به طور فزاینده ای مهم و تعیین کننده گردیده است. از دیدگاه تولید کنندگان بهینه سازی استفاده از منابع ماشین آلات و دستگاه‌ها بواسطه برنامه‌ای کارامد در سطح عملیاتی بسیار حیاتی است(Lu, Cui, & Han, 2015). فرض ادبیات مرسوم بر این است که ماشین آلات در تمامی اوقات در دسترس و مشغول به فعالیت هستند. اگر چه در بسیاری از مواقع ماشین آلات ممکن است در طول افق برنامه ریزی به دلایل گوناگون مانند خرابی ماشین یا تعمیرات مشغول به فعالیت نباشند. بررسی در دسترس بودن یا نبودن ماشین‌ها هر مسئله زمان‌بندی را با پیچیدگی مواجه می‌کند به ویژه در محیطی که سیستم‌ها به طور سری می‌باشند.

تعمیر و نگهدای پیشگیرانه به عنوان مجموعه‌ای از فعالیت‌ها با هدف بهبود قابلیت اطمینان کلی و در دسترس بودن یک سیستم تعریف می‌گردد. در حالیکه برنامه ریزی زمان‌بندی تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه با توجه به فعالیت‌های تعریف شده، زمان بین دو فعالیت تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه بسیار مهم بوده و می‌تواند بر هزینه‌های تعمیرات و نگهداری تأثیر بگذارد(Gao, Feng, Zhang, & Tan, 2015). برای حصول قابلیت اطمینان مورد نیاز، ممکن است فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در بعضی از اجزاء سیستم قبل از شروع فعالیت بعدی متوقف شود. انتخاب این اجزاء با منظور کمینه سازی اهداف هزینه و زمان از کار افتادگی و بیشینه سازی قابلیت اطمینان سیستم انجام می‌گیرد. از این رو ادبیات بحث بیشتر معطوف به پرداختن به اهداف مذکور است(Certa, Galante, Lupo, & Passannanti, 2011). توابع هزینه در حقیقت اشاره به اهمیت قابلیت اطمینان سیستم دارد در حالیکه سیستم در یک دوره بایستی مشغول به فعالیت باشد، حال آنکه زمان از کار افتادگی سیستم بیشتر مربوط به فرموله بندی مسئله چندهدفه است که در غالب بهینه سازی نگهداری و تعمیرات به آن پرداخته می‌شود.

برنامه‌ریزی تولید و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات به طور مستقیم زمان‌بندی عملیات ایستگاه‌های کاری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برنامه ریزی تولید با تخصیص منابع محدود به فعالیت‌های کاری برای بهینه کردن پاره‌ای از اهداف در ارتباط می‌باشد، برای مثال برای برآورده کردن کمترین زمان تاخیر یا زمان اتمام فعالیت‌ها. با توجه به ساختار و پیکره‌بندی کارگاه (ایستگاه‌های کاری تکی یا چندگانه، جریان و فرایند کار، سیستم‌های باز و ترکیبی) برخی از اهداف مهم باید بهینه شوند و دسته‌ای از محدودیت‌ها (تقدم و تأخرها، زمان های راه اندازی دستگاه‌ها و غیره) باید اعمال گردند. در سیستم‌های تولید واقعی، فعالیت ایستگاه‌های کاری با توجه به خرابی های غیرمنتظره و یا انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات ممکن است متوقف گردند. در برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات، مهمترین اقدام ایجاد یک برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه که اهداف خاصی مانند هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را کمینه کرده و شرایط ایستگاه کاری را از نظر قابلیت اطمینان در سطح قابل قبولی نگه دارد(Moghaddam, 2013). روشن است که استراتژی نگهداری و تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه در برگیرنده اهداف اساسی و متعارض هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و جایگزینی از یک سو و قابلیت اطمینان سیستم از سوی دیگر است. بدون شک سیستمی که تعمیرات و یا تعویض اجزاء آن بصورت منظم و دقیق انجام گیرد دارای قابلیت اطمینان بالایی خواهد بود (همچنین هزینه از کارافتادگی پایین) اما هزینه تعمیرات و نگهداری بالایی را تجربه می‌کند(Moghaddam & Usher, 2010). طراحان سیاست‌های نگهداری و تعمیر و جایگزینی پیشگیرانه باید اولویت های خود را برای هر یک از انواع هزینه و قابلیت اطمینان مشخص سازند.

در این پژوهش یک مدل چند هدفه فازی برای مسئله زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با اهداف کمینه هزینه خرابی، هزینه نگهداری و تعمیرات، هزینه جایگزینی، هزینه ثابت و هدف بیشینه قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن تورم در مدل ارائه می‌گردد. اگر چه رویکرد فازی چند هدفه باعث منعطف‌تر شدن مسئله بین اهداف متعارض می‌گردد اما در ادبیات بحث کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از اینرو مدیران و طراحان استراتژی

نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در تصمیم گیری های خود قدرت عمل بیشتری خواهند داشت. در ادامه این مقاله بدین شکل ارائه می گردد. بخش دوم ادابیات موضوع بحث مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش سوم فرموله بندی اهداف مسئله زمان‌بندی نگهداری، تعمیر و تعویض پیشگیرانه و قابلیت اطمینان سیستم ارائه می گردد. بخش چهارم به بررسی رویکرد مسئله فازی می‌پردازد. بخش پنجم به ارائه مثال عددی و نتایج محاسباتی می‌پردازد و در نهایت بخش ششم به نتیجه گیری پژوهش ختم می گردد.

پیشینه پژوهش

ادبیات پژوهش مباحث مربوط به برنامه ریزی و زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم نمود: ۱- نگهداری و تعمیرات زمان‌بندی شده و ۲- نگهداری و تعمیرات زمان‌بندی نشده. دومی مربوط به از کار افتادگی های غیر منتظره و ضروری می‌باشد و اولی شامل نگهداری و تعمیرات عادی و پیشگیرانه و زمان‌بندی تعمیرات اساسی و اصلاحی می‌باشد(Manzini, Accorsi, Cennerazzo, Ferrari, & Maranesi, 2015). تحقیقات پیشین مشارکت‌های مختلفی در نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و مباحث زمان‌بندی برای سیستم‌های تولیدی با تمرکز بر عملیات کاری داشته‌اند. به طور خاص، علوم مدیریت و تحقیق در عملیات دائماً مسائل مربوط به زمان‌بندی و بهینه سازی را مورد بحث قرار داده‌اند، اما مطالعات کمی پیرامون قابلیت اطمینان سیستم و انواع هزینه انجام گرفته است(Manzini, ; Regattieri, Manzini, & Battini, 2010Regattieri, Pham, & Ferrari, 2009). شروین (Sherwin, 2000) در یک مقاله مروری مباحث عمده مدیریت نگهداری و تعمیرات را مورد بررسی قرار داده و آنها را دسته‌بندی نموده است. بسیاری از تحقیقات پیشین در ارتباط با برنامه ریزی تعمیرات و نگهداری در حوزه تولید و عملیات بکار گرفته شده‌اند. برای مثال مدل‌ها و روش‌هایی که در فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر روی سیستم‌های تولیدی در معرض شکست برنامه‌ریزی شده‌اند(Hadidi, Al-Turki, & Rahim, 2011 ; Xiang, Cassady, Jin, & Zhang, 2014; Zhang & Nakamura, 2005). به طور خاص

مدل‌های برنامه ریزی یکپارچه برای فرموله کردن همزمان برنامه ریزی کارگاه و تعمیرات پیشگیرانه ارائه گردید (Cassady & Kutanoglu, 2005; Kuo & Chang, 2007). دوفوا و السلطان (Duffuaa & Al-Sultan, 1999) یکی از اولین مدل‌های برنامه ریزی تصادفی را برای مسئله زمان‌بندی ارائه کردند که دربرگیرنده همزمان شرایط قطعی و تصادفی می‌باشد. الگوریتم‌های ابتکاری برای حل مسئله زمان‌بندی توسط رضا و الترکی (Asif Raza & Mustafa Al-Turki, 2007) ارائه گردید. برنامه ریزی کارگاه و تعمیرات پیشگیرانه برای ماشین واحد توسط (Cassady & Kutanoglu, 2005; Leng, Batun & Azizo lu, 2009; Ren, & Gao, 2006; Pan, Liao, & Xi, 2010; Sortrakul & Cassady, 2007; Sortrakul, Nachtmann, & Cassady, 2005) ارائه گردید. در تحقیقات انجام شده کمینه سازی زمان مورد انتظار انجام کارها به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از مطالعات مذکور با نتایج به دست آمده از مدل‌های زمان‌بندی پیشگیرانه و زمان‌بندی عملیات کارگاه به صورت جداگانه مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته اند. همچنین سورتراکول و کسدی (Sortrakul & Cassady, 2007) سعی بر بهبود رویه حل از طریق استفاده از روش الگوریتم ژنتیک را داشته است. آلاوی و آرتیبا (Allaoui & Artiba, 2004) از طریق مدل بهینه سازی و شبیه سازی، یک مسئله تخصیص کار به ماشین را با در نظر گرفتن محدودیت تعمیرات پیشگیرانه در حالی که به دنبال بهینه کردن اهداف مختلفی همانند زمان جریان و سر رسید انجام کارها، زمان نظافت و زمان حمل و نقل کل بوده است را بررسی کردند. تحقیقاتی بر مبنای تحلیل کیفی بجای ارزیابی‌های کمّی نیز برای مسئله نگهداری و تعمیرات توسط محققین پیشنهاد شده است. قزایل و دیگران (Ghezail, Pierreval, & Hajri-Gabouj, 2010) با استفاده از شماتیک گراف که اثرات و پیامدهای انحرافات در عملکرد یک سیستم را نشان می‌داد به تحلیل راه حل های زمان‌بندی مسئله نگهداری و تعمیرات پرداختند. نمودار ایشان به تصمیم گیران کمک می‌کرد که راه حل مناسب را با آگاهی از دیگر راه‌حل های ممکن انتخاب کنند. مانزینی و دیگران (Manzini et al., 2015) با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط اقدام به زمان‌بندی برای یک

مسئله با رویکرد هزینه، قابلیت اطمینان و محدودیت منابع نمودند. مدل ایشان به دنبال کمینه کردن هزینه‌های قطعات یدکی به هنگام از کارافتادگی‌های برنامه‌ریزی نشده، هزینه‌های تعمیرات، هزینه‌های پیشگیرانه و هزینه پرسنل بوده است. رویکردهای مدلسازی متمایزی برای زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه توسط (ZhangXu, Han, Wang, & Sun, 2012 ; & Nakamura, 2005) پیشنهاد گردید که به تشریح یک مدل شبیه سازی پرداخته و یا یک الگوریتم هیوریستیک را بسط داده است، اما هیچ یک دارای یک سیستم پیشتیان تصمیم گیری برای مدیران نگهداری و تعمیرات نیست. همچنین یک مقاله توسط کناک و دیگران (Konak, Coit, & Smith, 2006) برای مسائل چند هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای مسائل بهینه سازی قابلیت اطمینان و تعمیرات پیشگیرانه ارائه گردید. مقدم (Moghaddam, 2013) در مقاله‌ای به نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه پرداخته و ضمن بررسی اهداف هزینه، قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم از روش شبیه سازی مونت کارلو و بهینه سازی بهره جسته است. مقدم و عاشر(Moghaddam & Usher, 2011) ضمن مدل کردن زمانبندی نت پیشگیرانه به مقایسه روشهای بهینه سازی و فرا ابتکاری پرداخته اند. گاستاوسن و دیگران (Gustavsson, Patriksson, Strömberg, Wojciechowski, & Önnheim, 2014) به حل یک مسئله پیچیده زمان‌بندی با در نظر گرفتن هزینه‌های بازه‌ای با استفاده از برنامه‌ریزی خطی صفر و یک شدند. مدل ایشان برای یافتن جواب‌های بهینه یک مسئله برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات با اجزاء چندگانه مورد استفاده قرار گرفته است.

بررسی ادبیات پیشین تحقیق همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، مبین این موضوع است که مدلی که اهداف مختلف هزینه که بعضاً با یکدیگر نیز متعارض هستند و همچنین هدف کلیدی قابلیت اطمینان را به طور همزمان بررسی نکرده‌اند به شکلی که قابلیتی برای مدیران فراهم آید که بتوانند درکی صحیحی از برآورده شدن هر یک از اهداف داشته باشند و بتوانند سناریوهای مختلف را برای مسئله بررسی کنند. برای مثال، بدون شک سیستمی که هزینه جایگزینی بالایی را تجربه کند، هزینه تعمیرات پایینی خواهد داشت و بالعکس، یا سیستمی که هزینه پایینی برای جایگزینی و تعمیرات را در بر داشته باشد، هزینه زمان از کار

افتادگی غیر منتظره و یا تصادفی سیستم بالا خواهد رفت و بالعکس و یا از دیدگاه کلی تر سیستمی که هزینه های بالایی را برای جایگزینی و تعمیرات در بازه‌های کوتاه‌تر را متحمل شود قابلیت اطمینان سیستم بالا خواهد رفت. این تعارضات را برای تمامی اهداف بدین شکل می‌توان تحلیل نمود.

جدول ۸. مقایسه ادبیات تحقیق در زمینه پژوهش و روش حل مسئله

ردیف	نویسنده و سال	اهداف و زمینه پژوهش	روش حل مسئله
۱	دووفوا و السلطان (۱۹۹۹)	برنامه ریزی زمانبندی نت پیشگیرانه با در نظر گرفتن محدودیت نیروی انسانی	برنامه ریزی تصادفی و برنامه ریزی عدد صحیح
۲	آلاوی و آرتیبا (۲۰۰۴)	زمانبندی کارگاه با در نظر گرفتن محدودیت تعمیرات پیشگیرانه با هدف بهینه کردن زمان جریان و سر رسید انجام کارها، زمان نظافت و زمان حمل و نقل کل	ترکیب مدل بهینه سازی و شبیه سازی
۳	کناک و دیگران (۲۰۰۶)	زمانبندی تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه با هدف بهینه سازی قابلیت اطمینان	برنامه ریزی چند هدفه، الگوریتم ژنتیک و روشهای متاهیوریستیک
۴	کو و چنگ (۲۰۰۷)	زمانبندی تولید و تعمیرات پیشگیرانه برای ماشین تکی با هدف کاهش زمان‌های تاخیر	برنامه ریزی پویا
۵	رضا و الترکی (۲۰۰۷)	زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه و فرایند تولید برای ماشین تکی	روش‌های جستجوی ممنوعه و تبرید شبیه سازی شده
۶	سورتراکول و	کاهش زمان تاخیر در زمانبندی نت و	الگوریتم ژنتیک

	کسدی (۲۰۰۷)	برنامه ریزی تولید	
۷	قزایل و دیگران (۲۰۱۰)	زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه و برنامه ریزی کارگاه با رویکرد کیفی	برنامه ریزی استوار
۸	پن و شای (۲۰۱۰)	کاهش زمان تاخیر با زمانبندی نت و تولید بطور همزمان	بهینه سازی
۹	مقدم و عاشر (۲۰۱۰)	زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه با دوره‌های زمانی مشخص و با بررسی اثر ضریب بهبود در مدل	برنامه ریزی چند هدفه
۱۰	مقدم و عاشر (۲۰۱۱)	زمانبندی تعمیرات پیشگیرانه با دوره‌های زمانی مشخص و با اهداف چندگانه و مقایسه روشهای دقیق و فرابتکاری	بهینه سازی و فرا ابتکاری
۱۱	شو و دیگران (۲۰۱۲)	بهینه‌سازی ریسک از کار افتادگی تعمیرات پیشگیرانه	الگوریتم ژنتیک
۱۲	مقدم (۲۰۱۳)	برنامه ریزی چند هدفه برای زمانبندی تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه با دوره-های زمانی مشخص	بهینه سازی چند هدفه و شبیه سازی مونت کارلو
۱۳	گاستاوسن و دیگران (۲۰۱۴)	مسئله پیچیده زمانبندی با در نظر گرفتن هزینه های بازه ای	برنامه ریزی خطی صفر و یک
۱۴	مانزینی و دیگران (۲۰۱۵)	زمان‌بندی برای یک مسئله با رویکرد هزینه، قابلیت اطمینان و محدودیت منابع	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط
۱۵	تحقیق حاضر	برنامه ریزی چندهدفه برای مسئله تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه در دوره های زمانی نامشخص و از پیش تعیین نشده با بررسی اثر تورم در مدل	بهینه سازی آرمانی فازی، برنامه ریزی غیرخطی و برنامه ریزی صفر و یک و عدد صحیح

همچنین محققین پیشین عمدتاً با تبدیل مسئله زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با بازه های زمانی مشخص به مسئله برنامه ریزی خطی که غالباً ماهیت آن در واقع غیر خطی است کوشیده‌اند تا مسئله را مدل کنند، حال آنکه این امر چناچه مسئله دارای فضای موجه غیر خطی باشد منجر به تغییر بخشی از ناحیه موجه مسئله گردیده و امکان دور شدن از جواب بهینه را فراهم می‌آورد و یا لزوماً جواب بهینه برنامه ریزی خطی شده و برنامه ریزی غیر خطی با هم برابر نیست. مدل ارائه شده در این پژوهش با بهره بردن از رویکرد برنامه ریزی فازی نه تنها می‌تواند سطح برآورده شدن هر یک از توابع هدف مسئله را به مدیران نشان دهد، بلکه می‌تواند با تبدیل محدودیت فازی به محدودیت قطعی امکان تحلیل سناریوهای مختلف را برای مدیران فراهم آورد. همچنین مدل با باقی ماندن در برنامه ریزی غیر خطی که ماهیت عمدتاً مسائل قابلیت اطمینان است و استفاده از برنامه ریزی عدد صحیح می‌کوشد تا به جواب بهینه برای مسئله زمان‌بندی پیشگیرانه برسد. همانطور که مقدم و عاشر نیز در پیشنهادات کرده‌اند، یکی دیگر از مسائلی که تحقیقات پیشین فراخور مورد مطالعه خود آن را در نظر نگرفته‌اند و یا برای جلوگیری از پیچیدگی مدل از آن پرهیز کرده‌اند بحث وارد کردن تورم در مدل بوده است (Moghaddam & Usher, 2010). تورم از جمله مسائلی است که در نظر گرفتن آن برای شرایط حاکم بر کشور ایران بسیار موضوعیت دارد. از اینرو در این پژوهش کوشیده‌ایم که نتایج مدل را هم در شرایط اعمال تورم و هم در شرایط ناچیز بودن تورم تحلیل و بررسی نماییم.

مدلسازی مسئله

مدل ارائه شده در این تحقیق برای زمان‌بندی اقدامات تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه در یک افق زمانی برنامه‌ریزی شده و بر خلاف پژوهش‌های پیشین در دوره‌های زمانی متغیر و از پیش تعیین نشده می‌باشد. مدل این تحقیق برگرفته از مدل (Moghaddam, 2013 ; Moghaddam & Usher, 2010, 2011) می‌باشد با این تفاوت که در تمامی مدلهای قبلی دوره‌های زمانی از پیش مشخص هستند اما در مدل حاضر تعیین بازه‌های زمانی برای دوره ها

توسط مدل بهینه تعیین می گردد. هدف اصلی مدل زمان‌بندی و برنامه‌ریزی برای تعمیرات و جایگزینی کمینه کردن هزینه های ازکارافتادگی، تعمیرات، جایگزینی یا تعویض، ثابت و بیشینه کردن قابلیت اطمینان سیستم است. در ادامه به تشریح مبسوط مدل پرداخته می‌شود.

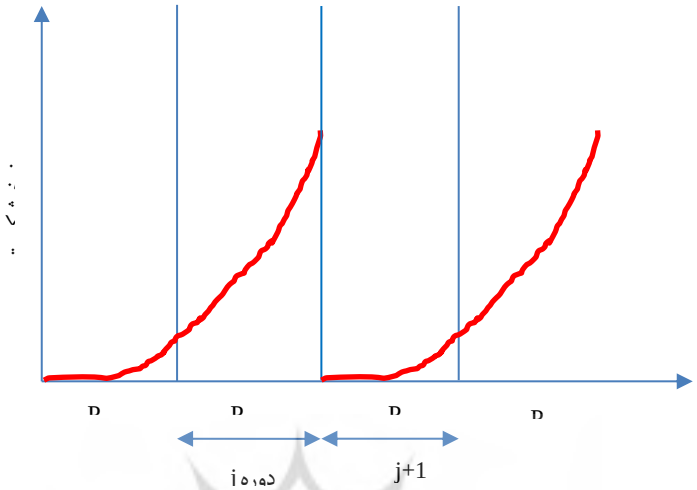
یک سیستم سری که دارای N جزء می‌باشد و هر جزء امکان از کار افتادگی و زوال را دارد را در نظر بگیرید. هر جزء i دارای نرخ شکست رو به افزایش $v_i(t)$، که در آن t نشان دهنده زمان می باشد. در این پژوهش فرض بر این است که خرابی قطعات از فرایند پواسون ناهمگن با نرخ خرابی به مانند زیر پیروی می کنند:

$$v_i(t) = \lambda_i \beta_i t^{\beta_i - 1} \quad \text{for i=1,...,N} \qquad (۱)$$

که در آن λ_i و β_i به ترتیب پارامتر مقیاس و پارامتر شکل برای جزء i می باشند. در این صورت فرایند پواسون ناهمگن مشابه با فرایند پواسون همگن می‌باشد که می‌توان انتظار داشت که نرخ خرابی تابعی از زمان باشد.

هدف این مدل در حقیقت برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات و عملیات تعویض برای هر جزء در دوره زمانی $[0, T]$ می باشد. بازه زمانی $[0, T]$ به J بازه زمانی گسسته تقسیم شده است که اندازه هر یک $P = \frac{T}{J}$ می باشد (شکل ۱). بدیهی و منطقی است که بازه‌های زمانی متغیر P بصورت واحد زمانی قابل اندازه گیری مرسوم یعنی روزانه، هفتگی، ماهیانه و یا سالیانه باشد که به این ترتیب بصورت عدد صحیح بیان می گردد. به بیانی دیگر، از آنجا که طول بازه‌ها نامعلوم است، در مدل به دنبال پیدا کردن متغیر P هستیم تا زمانبندی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بهینه گردد. در پایان دوره j ، سیستم یا تعمیر می گردد یا اجزاء جایگزین می‌شوند و یا هیچ اقدامی صورت نمی گیرد. فرض بر آن است که تعمیرات یا جایگزینی در دوره j عمر مؤثر (پیری) سیستم را کاهش داده و همچنین نرخ شکست سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای ساده سازی فرض می کنیم که فعالیت‌ها لحظه ای می باشد، برای مثال زمان مورد نیاز برای جایگزینی یا تعمیرات نسبت به اندازه فاصله بازه ناچیز است، اگر چه هزینه‌های مرتبط با این اقدامات را لحاظ خواهیم کرد.

شکل ۱. افزایش نرخ شکست با گذشت زمان و پیری سیستم



تعمیرات و نگهداری

عمر مؤثر یک سیستم در ابتدا و انتهای هر دوره را به ترتیب با X_j و Y_j نشان می‌دهیم که وابستگی آنها را در هر دوره به واسطه $\frac{T}{J}$ به مانند زیر نشان می‌دهیم:

$$Y_j = X_j + \frac{T}{J} \quad \text{for } j=1,...,T \qquad (2)$$

$$Y_j = X_j + P \quad \text{for } j=1,...,T$$

همچنین فرض بر آن است که عمر مؤثر اولیه سیستم برابر با صفر می‌باشد، بعلاوه فعالیت تعمیرات در پایان هر دوره صورت می گیرد و به صورت چشمگیری عمر مؤثر یا پیری سیستم را در شروع دوره بعدی بر اساس «ضریب بهبود» کاهش می‌دهد (Jayabalan & Chaudhuri, 1992). این نوع از نگهداری و تعمیرات مشخصه‌های سیستم را تغییر نمی‌دهد اما عمر مؤثر سیستم را کاهش می‌دهد و گاهی اوقات از آن به عنوان حداقل تعمیرات یاد می-شود.

$$X_{i,j+1} = \alpha \cdot Y_{i,j} \quad for\ i=1,...,N\ ;\ j=1,...,T\ ,\ (0 \le \alpha \le 1) \qquad (3)$$

که α بیانگر «ضریب بهبود» می‌باشد. این ضریب در واقع اثر متغیر تعمیرات را در پیری سیستم نشان می‌دهد. هنگامی که $\alpha = ۰$ باشد آنگاه اثر تعمیرات بر سیستم به گونه ای است که سیستم از نو بکار گرفته شده است و هنگامی که $\alpha = ۱$ باشد، تعمیرات اثری بر سیستم نداشته و سیستم در حالت ناکارامدی قبل باقی می‌ماند.

تعویض یا جایگزینی

اگر جزء i در پایان دوره j تعویض گردید، آنگاه:

$$X_{i,j+۱} = ۰ \quad for \quad i = ۱,...,N \;\; ; \;\; j = ۱,...,T \qquad (۴)$$

برای مثال، سیستم به حالتی بر می گردد که گویی از نو بکار گرفته شده است. نرخ وقوع شکست جزء i به صورت لحظه ای از $v_i(Y_j)$ به $v_i(۰)$ تغییر می کند.

بدون اقدام

اگر هیچ اقدامی در دوره j صورت نگیرد، هیچ تغییری در نرخ وقوع شکست جزء i رخ نخواهد داد و خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} &Y_{i,j} = X_{i,j} + P \quad \text{for i=۱,...,N ;} \quad \text{j=۱,...,T} \\ &X_{i,j+۱} = Y_{i,j} \qquad for \quad i = ۱,...,N \;\; ; \;\; j = ۱,...,T \qquad (۵) \\ &v_i(X_{i,j+۱}) = v_i(Y_{i,j}) \quad for \quad i = ۱,...,N \;\; ; \;\; j = ۱,...,T \end{aligned}$$

مفهوم فرمول بالا بدان معناست که نرخ وقوع شکست جزء i در ابتدای دوره j با انتهای دوره ماقبل خود برابر است.

هزینه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و جایگزینی

برای یک سیستم تازه بکار، در حقیقت به دنبال کشف هزینه های مربوط در یک برنامه زمان-بندی نگهداری و تعمیرات و جایگزینی فعالیت‌ها هستیم. هزینه نگهداری و تعمیرات و

جایگزینی مربوط به همه اجزاء در دوره j تابعی از همه فعالیت‌های انجام گرفته در دوره می‌باشد که به صورت دو تابع هدف مجزا به شکل زیر به آن پرداخته می‌شود.

هزینه از کارافتادگی یا خرابی

هنگامی که برای دوره های آتی سیستم برنامه ریزی می‌گردد باید هزینه غیر قابل اجتناب سیستم بر اساس خرابی های اتفاقی در نظر گرفته شوند، هرچند در ابتدای دوره اول مشخص نیست که این خرابی ها چه زمانی ممکن است به وقوع بپیوندد. با این حال اگر سیستم در یک دوره دارای نرخ خرابی بالا باشد، باید انتظار وقوع خرابی های متعدد و تبع آن هزینه های بالایی را داشت. با توجه به این موضوع، محاسبه تعداد شکست های مورد انتظار در هر دوره برای هر یک از اجزاء پیشنهاد می‌گردد. از اینرو، تعداد خرابی مورد انتظار E جزء i در دوره j به شکل زیر محاسبه می‌گردد:

$$E\left[\ \mathrm{N}_{i,j}\ \right]=\int_{X_{i,j}}^{Y_{i,j}} v_i(t)dt \quad \text{for i=۱,...,N; j=۱,...,T} \qquad (۶)$$

با در نظر گرفتن فرایند پواسون غیر همگن، تعداد خرابی مورد انتظار جزء i در دوره j به شکل زیر به دست می‌آید.

$$E\left[\ \mathrm{N}_{i,j}\ \right]=\lambda_i(Y_{i,j})^{\beta_i}-\lambda_i(X_{i,j})^{\beta_i} \quad \text{for i=۱,...,N; j=۱,...,T} \qquad (۷)$$

حال اگر هزینه از کار افتادگی هر یک از اجزاء را برابر با F_i در نظر بگیریم، آنگاه $F_{i,j}$ هزینه جزء i در دوره j خواهد بود که برابر است با:

$$\begin{aligned} F_{i,j} &= F_i(۱+\mathrm{inf})^j E\left[\ \mathrm{N}_{i,j}\ \right] \quad \text{for i=۱,...,N; j=۱,...,T} \\ F_{i,j} &= F_i(۱+\mathrm{inf})^j.\lambda_i(Y_{i,j})^{\beta_i}-\lambda_i(X_{i,j})^{\beta_i} \quad \text{for i=۱,...,N; j=۱,...,T} \end{aligned} \qquad (۸)$$

که inf نرخ تورم برای هر دوره می‌باشد. همچنین بدون در نظر گرفتن تعمیرات و جایگزینی که در آخر دوره j انجام می‌گیرد، هزینه های دیگری نیز مربوط به خرابی های محتمل الوقوع است که در طی دوره اتفاق می‌افتد.

هزینه‌های تعمیرات و جایگزینی

اگر تعمیرات بر روی جزء i در دوره j انجام شود، آنگاه هزینه تعمیرات برابر با M_i در انتهای دوره خواهد بود. اگر جزء i در دوره j جایگزین گردد، هزینه جایگزینی را برابر با قیمت اولیه خریداری شده جزء i در نظر گرفته می‌شود که برابر است با R_i .

در ابتدای دوره $j = ۰$ هدف بر آن است که هر یک از فعالیت‌های جایگزینی، تعمیرات و بدون اقدام برای هر یک از اجزاء در هر دوره به گونه ای مشخص گردد که کمترین هزینه را برای سیستم داشته باشد. به منظور تعیین $Y_{i,j}$، عمر جزء i در پایان دوره j، متغیرهای صفر و یک $m_{i,j}$ و $r_{i,j}$ به عنوان فعالیت‌های تعمیر یا تعویض جزء i در دوره j بدین صورت تعریف می‌گردد: $m_{i,j}$ برابر با یک اگر جزء i در دوره j تعمیر گردد، و در غیر اینصورت برابر با صفر و همچنین $r_{i,j}$ برابر با یک اگر جزء i در دوره j تعویض گردد، و در غیر اینصورت برابر با صفر می‌باشد. همچنین تابع بازگشتی متشکل از $X_{i,j}$، $Y_{i,j}$، $m_{i,j}$، $r_{i,j}$، α و یک محدودیت به شکل زیر قابل تعریف است:

$$\begin{cases} X_{i,j} = (۱-m_{i,j-۱})(۱-r_{i,j-۱})Y_{i,j-۱} + m_{i,j-۱}(\alpha Y_{i,j-۱}) \\ Y_{i,j} = X_{i,j} + P \end{cases} \qquad (۹)$$
$$m_{i,j} + r_{i,j} \le ۱$$

قابل ذکر است که محدودیت بالا بدان معنی است که برای جزء i در دوره j حداکثر یکی از فعالیت‌های تعمیر یا تعویض می‌تواند انجام شود. همچنین توابع مربوط به هزینه کل تعمیرات و جایگزینی به ترتیب با در نظر گرفتن نرخ تورم inf برای هر دوره به صورت زیر خواهد بود

$$\sum_{i=۱}^{N}\sum_{j=۱}^{T} M_i (۱+\inf)^j .m_{ij} \qquad (۱۰)$$
$$\sum_{i=۱}^{N}\sum_{j=۱}^{T} R_i (۱+\inf)^j .r_{ij}$$

هزینه ثابت

برای یک سیستم با اجزاء چندگانه، مسئله می تواند بدین شکل مطرح باشد که توالی بهینه فعالیت‌های تعمیرات، جایگزینی و بدون اقدام برای هر جزء بدون در نظر گرفتن اجزاء دیگر به چه شکل می‌باشد، یعنی می‌توان بهترین توالی فعالیت‌ها برای جزء اول را بدون در نظر گرفتن فعالیت‌های بر روی جزء دوم در نظر گرفت و به همین شکل برای اجزاء دیگر. این موضوع منتج به N مسئله بهینه سازی مستقل می گردد. مدل‌های از این قبیل غیر واقعی به نظر می‌رسند، چرا که باید یک هزینه کلی وارد بر سیستم هنگامی که یک فعالیتی بر روی هر یک از اجزاء سیستم صورت می گیرد، وجود داشته باشد. به نظر می‌رسد منطقی باشد که فعالیتهای جایگزینی و تعمیرات را باهم ترکیب نمود، بدین شکل که هنگامی که سیستم به منظور تعویض یک جزء متوقف است، فعالیت مربوط به تعمیر یا تعویض بعضی از اجزاء دیگر را نیز انجام داد، حتی اگر هر یک از اجزاء دیگر لزوماً در نقطه بهینه که باید جایگزینی یا تعمیرشان صورت بگیرد، نباشند. با توجه به توضیحات مذکور، زمان مطلوب فعالیت‌های جایگزینی یا تعمیرات بر هر یک از اجزاء وابسته است بر تصمیمی که برای هر یک از اجزاء دیگر اتخاذ می‌شود. از اینرو، یک هزینه ثابت Z برای «زمان از کارافتادگی» برای دوره j تعریف می-گردد اگر یک یا چند جزء در این دوره تعمیر یا تعویض گردند. اگرچه وارد نمودن این هزینه ثابت مدل را با پیچیدگی‌هایی همراه می کند اما باعث می‌شود به واقعیت‌های پیرامون مسئله نزدیک‌تر گردد.

قابل ذکر است عمر اولیه تمامی اجزاء برابر با صفر در نظر گرفته شده است یعنی $X_{i,۰}=۰$. اگر تعویض قطعه‌ای در دوره قبل صورت بگیرد، آنگاه $r_{i,j-۱}=۱$ و $m_{i,j-۱}=۰$ و در نتیجه $X_{i,j}=۰$ خواهد شد. اگر تعمیر قطعه‌ای در دوره قبل صورت بگیرد، آنگاه $r_{i,j-۱}=۰$ و $m_{i,j-۱}=۱$ و در نتیجه $X_{i,j}=\alpha Y_{i,j-۱}$ و در نهایت هیچ اقدامی صورت نمی گیرد اگر $r_{i,j-۱}=۰$ و $m_{i,j-۱}=۰$ و در نتیجه $X_{i,j}=Y_{i,j-۱}$ که به مفروضات اولیه

مسئله بر می‌گردد. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان تابع هزینه ثابت را با در نظر گرفتن نرخ تورم به شکل زیر نشان داد:

$$\sum_{j=1}^{T}\left[Z\,(1+\inf)^{j}\left(1-\prod_{i=1}^{N}\left(1-\left(m_{i,j}+r_{i,j}\right)\right)\right)\right] \qquad (11)$$

در فرمول بالا، برای هر قطعه در هر دوره همانطور که گفته شد یا هیچ اقدامی صورت نمی‌گیرد، یا قطعه جایگزین می‌گردد و یا تعمیر می‌گردد. اگر اقدامی صورت نگیرد، از آنجا که $m_{i,j}$ و $r_{i,j}$ برابر صفر میگردند، عبارت بعد از عملگر ضرب برابر با یک می‌شود که از عدد یک قبل از عملگر ضرب کسر گردیده و برابر صفر خواهد شد. سپس در هزینه ثابت و نرخ تورم ضرب می‌شود که نتیجه باز صفر خواهد بود. این بدان معناست که از آنجا که سیستم متوقف نشده متحمل هزینه‌ای نگردیده است. حال چنانچه جایگزینی و یا تعمیری صورت گیرد، از آنجا که $m_{i,j}$ یا $r_{i,j}$ یکی برابر یک می‌گردد، عبارت بعد از عملگر ضرب صفر می‌گردد، که پس از کسر از عدد یک قبل از عملگر ضرب مجدداً کل عبارت داخل گیومه برابر یک می‌گردد. سپس عدد یک در هزینه ثابت و نرخ تورم ضرب می‌گردد که کل عبارت برابر با هزینه ثابت در نرخ تورم آن دوره خواهد بود. عملگر جمع در واقع مجموع کل هزینه ثابت برای تمامی قطعات یا ماشین آلات را در ادوار مختلف محاسبه می‌نماید.

قابلیت اطمینان سیستم

این پژوهش می‌کوشد تا با حداقل نمودن هزینه های مربوط به سیستم، قابلیت اطمینان سیستم را به حداکثر برساند. قابلیت اطمینان جزء i در پایان دوره j به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$R_{ij}=e^{-E\left[N_{ij}\right]} \qquad (12)$$

که در فرمول فوق e عدد نپر می‌باشد. با توجه به تعریف مذکور قابلیت اطمینان سیستم سری به شکل زیر خواهد بود:

$$R=\prod_{i=۱}^{N}\prod_{j=۱}^{T}e^{-E\left[N_{ij}\right]}$$
$$R=\prod_{i=۱}^{N}\prod_{j=۱}^{T}e^{-\lambda_i\left((Y_{i,j})^{\beta_i}-(X_{i,j})^{\beta_i}\right)} \quad (۱۳)$$

حال با توجه به توضیحات داده شده می‌توان مدل چند هدفه برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح را به مانند زیر نشان داد.

$$f_۱(X)=Min\sum_{i=۱}^{N}\sum_{j=۱}^{T}F_i(۱+\inf)^j.\lambda_i\left((Y_{i,j})^{\beta_i}-(X_{i,j})^{\beta_i}\right)$$
$$f_۲(X)=Min\sum_{i=۱}^{N}\sum_{j=۱}^{T}M_i(۱+\inf)^j.m_{ij}$$
$$f_۳(X)=Min\sum_{i=۱}^{N}\sum_{j=۱}^{T}R_i(۱+\inf)^j.r_{ij} \quad (۱۴)$$
$$f_۴(X)=Min\sum_{j=۱}^{T}\left[Z(۱+\inf)^j\left(۱-\prod_{i=۱}^{N}\left(۱-\left(m_{i,j}+r_{i,j}\right)\right)\right)\right]$$
$$f_۵(X)=Max\prod_{i=۱}^{N}\prod_{j=۱}^{T}e^{-\lambda_i\left((Y_{i,j})^{\beta_i}-(X_{i,j})^{\beta_i}\right)}$$

$st.$

$X_{i,۱}=۰$ i=۱,...,N

$X_{i,j}=(۱-m_{i,j-۱})(۱-r_{i,j-۱})Y_{i,j-۱}+m_{i,j-۱}(\alpha Y_{i,j-۱})$ i=۱,...,N; j=۲,...,T

$Y_{i,j}=X_{i,j}+P$ i=۱,...,N; j=۱,...,T

$m_{i,j}+r_{i,j}\le ۱$ i=۱,...,N; j=۱,...,T

$m_{i,j},r_{i,j}=۰$ or ۱ i=۱,...,N; j=۱,...,T

$X_{i,j},Y_{i,j}\ge ۰$ i=۱,...,N; j=۱,...,T

P=Integer

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

برنامه ریزی آرمانی فازی

یکی از کاراترین رویکردهای که در چند دهه اخیر برای مواجه با شرایط عدم قطعیت و ابهام پیرامون مسائل مورد استفاده قرار گرفته است استفاده از برنامه ریزی فازی پیشنهاد شده توسط زاده(Zadeh, 1965) می‌باشد. مجموعه‌ی فازی A به مانند زیر تعریف می‌شود:

$$A=\left\{x,\mu_A(x)\,|\,x\in A\right\} \qquad (۱۵)$$

که $A\rightarrow[۰,۱]$ تابع عضویت A و $\mu_A(x)$ که در آن $x\in A$ درجه‌ی عضویت نامیده می‌شود. تابع عضویت شبه مثلثی برای مساله‌ی چند هدفه، بیش‌ترین کاربرد را در پیشینه‌ی تحقیق داشته است. بر اساس تعریف تابع عضویت تیواری (Tiwari, Dharmar, & Rao, 1987)، هر تابع بین کمترین و بیشترین سطوح تمایل خود محدود شده، کمینه یا بیشینه بودن تابع مد نظر است. اگر تابع از نوع کمینه باشد، تابع عضویت آن به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{f_i}(x)=\begin{cases}۱ & f_i(x)\le f_i^{*}\\ ۱-\dfrac{f_i(x)-f_i^{*}}{f_i^{\max}-f_i^{*}} & f_i^{*}\le f_i(x)\le f_i^{max}\\ ۰ & f_i(x)\ge f_i^{max}\end{cases} \qquad (۱۶)$$

که در آن f_i^{*} سطح مطلوبیت برای تابع هدف $f_i(x)$ ، $f_i^{\max}$ حد مجاز برای $f_i(x)$، و (f_i^{*},f_i^{max}) فاصله‌ی مجاز برای تابع هدف فازی $f_i(x)$ است. هم‌چنین اگر تابع هدف از نوع بیشینه باشد، تابع عضویت آن به شکل زیر خواهد بود:

$$\mu_{f_i}(x)=\begin{cases}۱ & f_i(x)\ge f_i^{*}\\ ۱-\dfrac{f_i^{*}-f_i(x)}{f_i^{*}-f_i^{min}} & f_i^{min}\le f_i(x)\le f_i^{*}\\ ۰ & f_i(x)\le f_i^{min}\end{cases} \qquad (۱۷)$$

که در آن $(f_i^{\min},f_i^{*})$ فاصله‌ی مجاز قابل پذیرش برای تصمیم‌گیرنده خواهد بود. در نهایت مساله‌ی چندهدفه‌ی زیر قابلیت حل خواهد داشت:

$$\max \left[\min\left(\mu_{f_i}(x)\right)\right]$$
$$s.t.$$
$$x \in A. \qquad (۱۸)$$

حال با توجه به توضیحات داده شده مدل چند هدفه فازی برای مسئله تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$Max \sum_{k=۱}^{K} \mu_k(x)$$
$$s.t.$$

$\mu_k(x) \le \mu_{f_k}(x)$	k=1,...,K
$X_{i,۱} = ۰$	i=۱,...,N
$X_{i,j} = (۱-m_{i,j-۱})(۱-r_{i,j-۱})Y_{i,j-۱} + m_{i,j-۱}(\alpha Y_{i,j-۱})$	i=۱,...,N; j=۲,...,T (۱۹)
$Y_{i,j} = X_{i,j} + P$	i=۱,...,N; j=۱,...,T
$m_{i,j} + r_{i,j} \le ۱$	i=۱,...,N; j=۱,...,T
$m_{i,j}, r_{i,j} = ۰$ or ۱	i=۱,...,N; j=۱,...,T
$X_{i,j}, Y_{i,j} \ge ۰$	i=۱,...,N; j=۱,...,T
P=Integer	

مثال عددی

به منظور حل مثال عددی، داده‌های مورد نیاز در جدل ۲ نشان داده شده است. هزینه ثابت برابر ۳ میلیارد ریال، نرخ تورم سالانه برابر ۲۴ درصد و مقادیر مطلوبیت‌های توابع هدف فازی در جدول ۳ نشان داده شده است. به منظور تعیین مقادیر مطلوبیت فازی از رویکرد زیمرمن (Zimmermann, 1978) استفاده شده است. در این رویکرد هر یک از توابع هدف به صورت مجزا با در نظر گرفتن محدویت‌های مدل بیشینه و کمینه می‌گردد تا مقادیر مطلوبیت‌های فازی برای آنها به دست آید. از نرم افزار GAMS و حل کننده DICOPT برای حل مدل استفاده شده است. قابل ذکر است که مدل برنامه ریزی غیر خطی چند هدفه عدد صحیح فازی که می‌کوشد سیستم با پنج جزء سری را پوشش دهد برای مدت دوازده ماه زمان‌بندی

نماید و واحد زمان ماه می‌باشد. پس از حل مدل متغیر طول بازه هر دوره کمترین مقدار خود یعنی برابر با یک شد. بدین صورت که طول هر بازه زمانی برابر با یک ماه می‌باشد.

جدول ۹- داده های مورد نیاز برای حل مثال عددی

جزء	λ	β	α	هزینه خرابی (میلیون ریال)	هزینه تعمیرات (میلیون ریال)	هزینه جایگزینی (میلیون ریال)
۱	۰/۰۰۰۳۲	۲/۸۰	۰/۰۸	۸۰۰	۵۰	۷۵۰
۲	۰/۰۰۰۲۲	۳/۳۰	۰/۱۵	۹۵۰	۱۰۰	۶۵۰
۳	۰/۰۰۰۳۸	۳/۰۰	۰/۲۰	۷۸۰	۷۰	۷۰۰
٤	۰/۰۰۰۲۶	۳/۲۰	۰/۱۰	۸۵۰	۳۰	۷۸۰
۵	۰/۰۰۰۳۰	۲/۹۰	۰/۲۰	۸۸۰	۹۰	۷۲۰

جدول ۳. مقادیر مطلوب برای توابع هدف فازی

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
f^*	۶۲/۳۲۰	۰	۰	۰	۰/۹۲۹
$f^{\min/\max}$	۱۶۷۸/۹۲	۲۲۰۰	۹۰۰۰	۱۵۰۰۰	۰/۱۳۸

جدول ۴ نشان دهنده مقادیر درجه عضویت هریک از توابع هدف فازی و برآورده شدن آنها را برای سه سناریوی مختلف با در نظر گرفتن تورم و بدون آن را نشان می‌دهد. در سناریوی اول هر یک از توابع با درجه اهمیت یکسان در مدل آورده شده است. جدول ۵ نشان دهنده

حالت بهینه زمان‌بندی تعمیرات، جایگزینی و یا بدون اقدام برای این سناریو در هر دو حالت با تورم و بدون تورم می‌باشد. قابل ذکر است که حروف «ت» و «ج» به ترتیب نشان دهنده تعمیرات و جایگزینی هر یک از اجزاء در دوره مذکور بوده و جاهای خالی در جدول حاکی از آن است که هیچ اقدامی نباید صورت گیرد. در سناریوی دوم مقادیر درجه عضویت هر یک از توابع فازی با دو برابر شدن اهمیت تابع قابلیت اطمینان می‌باشد که در جدول۶ حالت بهینه زمان‌بندی تعمیرات و جایگزینی برای آن نشان داده شده است. مدل این قابلیت را نیز دارا است که برای هر سطحی از توابع هزینه یا قابلیت اطمینان مسئله را حل نمود. بدین شکل که به سادگی محدویت فازی را تبدیل به محدودیت قطعی نموده و با حذف متغیر فازی در تابع هدف، بجای متغیر فازی مقدار دلخواه را گذاشته و مسئله را حل نمود. از این رو سناریوی سوم نشان دهنده مقادیر درجه عضویت در سطح قابلیت اطمینان ۹۰٪ می‌باشد که جدول ۷ نشان دهنده زمان‌بندی بهینه در این سطح از قابلیت اطمینان می‌باشد. قابل ذکر است که عدد مربوط به درجه عضویت فازی تابع قابلیت اطمینان(۰/۹۵) پس از حل مدل بهینه مدل در سطح قابلیت اطمینان ۹۰٪ به دست آمد و تنها به منظور مقایسه درجات عضویت در سناریوهای مختلف به جدول اضافه شد.

جدول ۴. مقادیر درجه عضویت به دست آمده برای توابع هدف فازی

شماره	سناریو	f_1		f_2		f_3		f_4		f_5	
		بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم
۱	مقادیر درجات عضویت بهینه	۰/۸۸۶	۰/۸۷۸	۰/۹۷۳	۰/۹۵۶	۰/۸۸۷	۰/۸۹۲	۰/۸۳۳	۰/۸۱۲	۰/۶۹۹	۰/۷۲۳
۲	مقادیر درجات عضویت با دو برابر شدن ضریب اهمیت تابع قابلیت اطمینان	۰/۹۳۹	۰/۹۱۵	۰/۹۶۸	۰/۹۷۰	۰/۸۰۳	۰/۷۷۹	۰/۷۵۰	۰/۷۱۸	۰/۸۲۵	۰/۷۹۹
۳	مقادیر درجات عضویت در سطح قابلیت اطمینان ۹۰٪	۰/۹۸۴	۰/۹۶۹	۰/۹۵۳	۰/۹۴۸	۰/۵۸۹	۰/۶۳۱	۰/۵۰۰	۰/۵۳۲	۰/۹۵	۰/۹۲۳

جدول ۵. زمان‌بندی تعمیرات و جایگزینی بهینه

دوره	۱		۲		۳		٤		٥		٦		۷		۸		۹		۱۰		۱۱		۱۲	
	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم
جزء۱	–	–	–	–	–	–	–	ت	ت	–	–	–	–	–	ج	ت	–	–	–	–	–	–	–	–
جزء۲	–	–	–	–	–	–	–	ج	ج	–	–	–	–	–	ج	ج	–	–	–	–	–	–	–	–
جزء۳	–	–	–	–	–	–	–	ج	ج	–	–	–	–	–	ج	ج	–	–	–	–	–	–	–	–
جزء٤	–	–	–	–	–	–	–	ت	ت	–	–	–	–	–	ت	ت	–	–	–	–	–	–	–	–
جزء٥	–	–	–	–	–	–	–	ج	ج	–	–	–	–	–	ج	ج	–	–	–	–	–	–	–	–

جدول ۶. زمان‌بندی تعمیرات و جایگزینی بهینه با دو برابر شدن ضریب اهمیت تابع قابلیت اطمینان

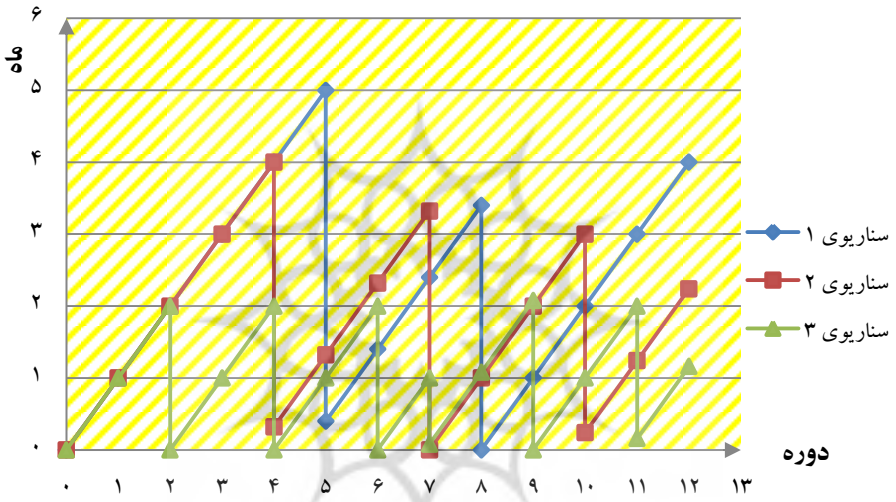
دوره	۱		۲		۳		٤		٥		٦		۷		۸		۹		۱۰		۱۱		۱۲	
	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم
جزء۱	–	–	–	–	–	–	ت	ت	–	–	–	ج	ج	–	–	–	–	–	ت	–	–	–	–	–
جزء۲	–	–	–	–	–	–	ج	ج	–	–	–	ج	ج	–	–	–	–	–	ج	–	–	–	–	–
جزء۳	–	–	–	–	–	–	ج	ج	–	–	–	ج	ج	–	–	–	–	–	ج	–	–	–	–	–
جزء٤	–	–	–	–	–	–	ج	ج	–	–	ت	–	ج	–	–	ت	–	–	ت	–	–	–	–	–
جزء٥	–	–	–	–	–	–	ج	ج	–	–	ج	–	ج	–	–	ج	–	–	ج	–	–	–	–	–

جدول ۷. زمان‌بندی تعمیرات و جایگزینی بهینه در سطح قابلیت اطمینان ۹۰٪

دوره	۱		۲		۳		٤		٥		٦		۷		۸		۹		۱۰		۱۱		۱۲	
	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم	بدون تورم	با تورم
جزء۱	–	–	ج	ت	–	–	ج	ج	–	–	ج	ج	ت	–	–	ج	ج	ت	–	–	ت	–	–	–
جزء۲	–	–	ج	ج	–	–	ج	ج	–	–	ج	ج	ج	–	–	ج	ج	ج	–	–	ج	–	–	–
جزء۳	–	–	ج	ج	–	–	ج	ج	–	–	ج	ج	ج	–	–	ج	ج	ج	–	–	ج	–	–	–
جزء٤	–	–	ت	ت	–	–	ج	ج	–	–	ت	ت	ت	–	–	ت	ج	ج	–	–	ج	–	–	–
جزء٥	–	–	ج	ج	–	–	ج	ج	–	–	ج	ج	ج	–	–	ج	ج	ج	–	–	ج	–	–	–

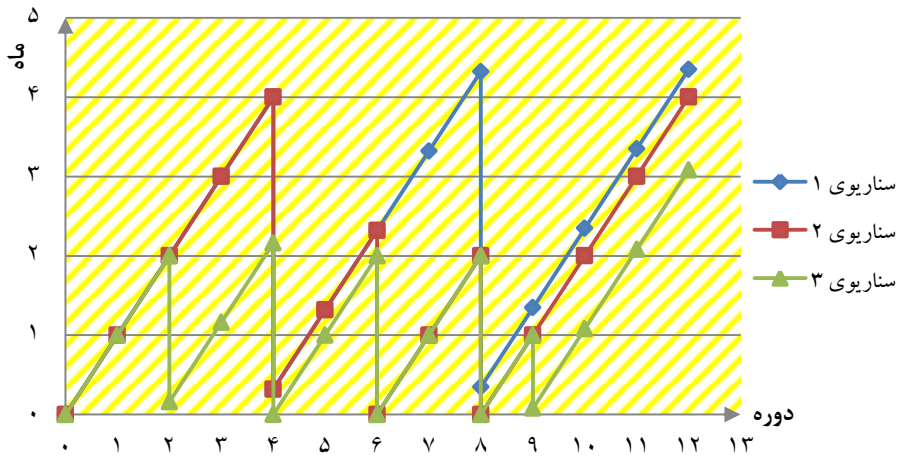
قابل ذکر است در مدل مذکور فعالیت‌های تعمیرات و جایگزینی در دوره‌های یکسان اتفاق می‌افتد که علت آن اثر اعمال هزینه ثابت به دلیل توقف سیستم می‌باشد. از دیگر ویژگی‌های مدل تحلیل عمر مؤثر اجزاء سیستم می‌باشد. مدل این قابلیت را برای مدیران و مهندسان نگهداری و تعمیرات فراهم می آورد که عمر مؤثر اجزاء را برآورد کنند و با استفاده از اطلاعات مربوطه اقدامات لازم در مورد پایش و کنترل سیستم را انجام دهند. برای مثال هنگامی یک جزء به عمر تعیین شده خود رسید، نظارت‌ها، بازرسی‌ها و بررسی های تکمیلی می‌تواند تضمین کننده کاهش هزینه‌های از کارافتادگی سیستم باشد. حل مدل متضمن تعیین دقیق متغیرهای عمر مؤثر اجزاء در ابتدا و انتهای هر دوره می‌باشد. برای مثال عمر مؤثر جزء اول در سناریوهای مختلف در حالت بدون تورم در شکل ۲ نشان داده شده است و به منظور پرهیز از تراکم اشکال اجزاء دیگر در مقاله از نشان دادن آنها صرفنظر شد. توجه داشته باشید همان گونه که پیش‌تر نیز بدان اشاره شد عمر مؤثر اجزاء در انتهای دوره برابر است با عمر

مؤثر اجزاء در ابتدای دوره بعلاوه یک ماه. همانطور که در شکل ۲ نیز مشهود است با افـزایش ضریب اهمیت یا مقدار قابلیت اطمینان سیستم عمر مـؤثر اجـزا کـاهش مـی‌یابـد و در حقیقـت سیستم نو می‌گردد. نزول ناگهانی نمودار در بعضی از دوره های به دلیـل جـایگزینی یـا تعمیـر جزء مربوطه در انتهای دوره مذکور می‌باشد که باعث نو شدن جزء گردیده که این امـر سـبب کاهش عمر مؤثر آن می‌گردد. همانگونه که در شکل ۳ نیـز مشـخص اسـت، اعمـال تـورم در مدل نه تنها منجر به تغییر زمانبندی تعمیرات و نگهداری می‌گردد، بلکه عمر مـؤثر اجـزا را نیـز تحت تاثیر قرار می‌دهد.



شکل ۲. عمر مؤثر جزء اول در هر دوره برای سناریوهای مختلف بدون در نظر گرفتن تورم

پرتال جامع علوم انسانی



شکل ۳. عمر مؤثر جزء اول در هر دوره برای سناریوهای مختلف با در نظر گرفتن تورم

بدون تردید بررسی اعتبار مدل یکی از مهمترین موضوعاتی است که در پژوهش بدان پرادخته می‌شود. اعتبار مدل در این تحقیق از طریق تغییر مقادیر پارامترها، حذف و یا اضافه نمودن یک پارامتر، و انتظار جواب منطقی نسبت به تغییرات حاصل شده می‌باشد. حل مدل در سناریوهای مختلف و با تغییر ضریب اهمیت تابع قابلیت اطمینان که منجر به جواب‌های مختلف در برنامه زمانبندی می گردد، حاکی از آن است که مدل نسبت به تغییر پارامترها حساسیت نشان می‌دهد. بدیهی است همانگونه که پیشتر گفته شد، با افزایش تعداد دوره‌های عملیات تعمیرات و یا جایگزینی، انتظار داریم که قابلیت اطمینان سیستم افزایش یابد، که این موضوع بصورت منطقی در جداول ۵ تا ۷ مشهود است. بدون شک نزدیکی به آرمان تعیین شده برای تابع قابلیت اطمینان منجر به دور شدن از آرمان‌های توابع هزینه جایگزینی و تعمیرات گردیده و هزینه از کارافتادگی غیرمنتظره سیستم را نیز کاهش می‌دهد که منجر به نزدیکی به آرمان مربوطه می‌شود. حال آنکه به علت افزایش تعداد عملیات‌های جایگزینی و تعمیرات سیستم از دسترس خارج بوده و هزینه ثابت سیستم را بر اثر عدم فعالیت افزایش می‌دهد که باعث دوری از آرمان مربوطه می گردد که در جدول ۴ قابل ملاحظه است. بطور کلی با افزایش قابلیت اطمینان سیستم، هزینه‌های جایگزینی، تعمیرات و ثابت افزایش یافته و

هزینه از کار افتادگی‌های غیرمنتظره کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش هزینه جایگزینی، هزینه تعمیرات کاهش یافته و با افزایش هزینه جایگزینی و تعمیرات، هزینه ثابت نیز افزایش می‌یابد. اما در مورد اینکه فقط با افزایش یا کاهش یکی از هزینه‌های جایگزینی و تعمیرات، هزینه ثابت چگونه تغییر می‌کند، نمی‌توان اظهار نظر کرد. این موضوع مربوط به زمان عدم فعالیت سیستم است که زمان عدم فعالیت سیستم که مربوط به انجام فعالیت‌های جایگزینی و یا تعمیرات است که در این پژوهش ناچیز فرض شده است که می‌تواند یکی از محدودیت-های پژوهش حاضر باشد. همانطور که در جداول ۵ تا ۷ دیده می‌شود اعمال تورم زمانبندی برای تمامی سناریوها را با تغییر مواجه کرد که این موضوع خود نیز می‌تواند گواه بر اعتبار مدل باشد. اگر چه در شکل‌های ۲ و ۳ عمر مؤثر سیستم برای جزء اول هم با اعمال تورم و هم بدون آن نشان داده شده است، اما این موضوع می‌تواند از طریق جداول ۵ تا ۷ نیز نتیجه گیری شود. برای مثال جهت محاسبه عمر هر یک از اجزاء که در واقع متغیرهای مدل می‌باشند، از طریق اینکه آیا جزء مورد بررسی باید تعمیر شود (یعنی متغیر صفر و یک مربوطه عدد به خود گرفته است که در جدول با «ت» نشان داده شده است)، جایگزین شود (یعنی متغیر صفر و یک مربوطه عدد به خود گرفته است که در جدول با «ج» نشان داده شده است) و یا بدون اقدام باشد (که با خط تیره نشان داده شده است) می‌توان اظهار نظر کرد. طول بازه زمانی برای تمامی سناریوها بدون تغییر ماند به این دلیل که کمترین مقدار خود را اختیار کرده بود. مثلا اگر واحد زمانی برای انجام تعمیرات و جایگزینی را برابر هفته فرض می‌کردیم، بدون شک با افزایش ضریب قابلیت اطمینان طول بازه‌ها کمتر از یک ماه می‌شد اما در نظر گرفتن واحد زمانی بصورت ماهیانه منجر به عدم تغییر مقدار P گردید.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش برای حل مسئله زمان‌بندی برای تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه با اهداف چندگانه و بعضاً متعارض، یک مدل برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح ارائه گردید. رویکرد فازی مورد استفاده در روش پیشنهادی باعث می‌گردد که مدل منعطف‌تر گردیده و مدیران و

مهندسان تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه درک صحیح‌تری از برآورده شدن اهداف مسئله داشته باشند. همچنین مدل ارائه گردیده دارای این قابلیت است که محدودیت فازی برای هر یک از توابع هدف تبدیل به محدودیت قطعی گردیده و در مدل وارد گردد. برای مثال مدیران تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه می‌توانند تعیین کنند که سیستم در چه سطحی از قابلیت اطمینان باشد و یا با چه بودجه‌ای اقدامات تعمیرات و جانشینی پیشگیرانه انجام گیرد. مدل ارائه شده در این مقاله برای سه سناریو حل گردید و نتایج و زمان‌بندی بهینه برای یک دوره یکساله که بر دوازده ماه تقسیم شده بود، به دست آمد. اینکه مدل می‌تواند برای هر سناریوی احتمالی دیگر بکار رفته و توازن بین اهداف مسئله زمان‌بندی را بشمار آورد، حاکی از توانمندی آن در حل مسئله تعمیرات و جایگزینی پیشگیرانه است. همچنین اعمال تورم در مدل اگر چه منجر به پیچیدگی بیشتر مدل گردید، اما باعث شد مدل واقع بینانه‌تر بوده و به شرایط دنیای واقعی نزدیکتر شود. همچنین همانطور که مشاهده شد، اعمال تورم در مدل نه تنها برنامه زمانبندی را برای جایگزینی، تعمیر و بدون اقدام با تغییر مواجه کرد، بلکه عمر مؤثر اجزاء را هم تحت تاثیر قرار داد.

به منظور بسط و توسعه پژوهش حاضر پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌گردد. پیشنهاد می گردد پارامترهای طول زمان انجام تعمیرات و جایگزینی به مدل وارد گردد و همانطور که پیشتر گفته شد محدودیت این پژوهش را مرتفع سازد. همچنین، بسیار واقع بینانه می‌باشد که برای مدل حاضر خرابی‌های غیر منتظره با استفاده از شبیه سازی به حساب آیند، چنانچه که در دنیای واقعی نیز اتفاق می‌افتد. قابل ذکر است استفاده از شبیه سازی برای تعیین زمانبندی می‌تواند منجر به بهبودهایی در هزینه و زمان گردد که بررسی آن و مقایسه نتایج آن با پژوهش حاضر می تواند درخور توجه باشد. تعیین شرایط عدم اطمینان برای برخی از پارامترهای مدل و بیان آنها به صورت فازی یا تصادفی و همچنین در نظر گرفتن خرابی‌های غیر منتظره یا برنامه‌ریزی نشده می‌تواند از موضوعات جذاب برای پژوهش‌های آتی باشد.

منابع

Allaoui, H., & Artiba, A. (2004). Integrating simulation and optimization to schedule a hybrid flow shop with maintenance constraints. Computers & Industrial Engineering, 47(4), 431-450.

Asif Raza, S., & Mustafa Al-Turki, U. (2007). A comparative study of heuristic algorithms to solve maintenance scheduling problem. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 13(4), 398-410.

Batun, S., & Azizo lu, M. (2009). Single machine scheduling with preventive maintenances. International Journal of Production Research, 47(7), 1753-1771.

Cassady, C. R., & Kutanoglu, E. (2005). Integrating preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine. Reliability, IEEE Transactions on, 54(2), 304-309.

Certa, A., Galante, G., Lupo, T., & Passannanti, G. (2011). Determination of Pareto frontier in multi-objective maintenance optimization. Reliability Engineering & System Safety, 96(7), 861-867.

Duffuaa, S. O., & Al-Sultan, K. (1999). A stochastic programming model for scheduling maintenance personnel. Applied Mathematical Modelling, 23(5), 385-397.

Gao, Y., Feng, Y., Zhang, Z., & Tan, J. (2015). An optimal dynamic interval preventive maintenance scheduling for series systems. Reliability Engineering & System Safety, 142, 19-30.

Ghezail, F., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2010). Analysis of robustness in proactive scheduling: A graphical approach. Computers & Industrial Engineering, 58(2), 193-198.

Gustavsson, E., Patriksson, M., Strömberg, A.-B., Wojciechowski, A., & Önnheim, M. (2014). Preventive maintenance scheduling of multi-component systems with interval costs. Computers & Industrial Engineering, 76, 390-400.

Hadidi, L. A., Al-Turki, U. M., & Rahim, A. (2011). Integrated models in production planning and scheduling, maintenance and quality: a review. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 10(1), 21-50.

Jayabalan, V., & Chaudhuri, D. (1992). Cost optimization of maintenance scheduling for a system with assured reliability. Reliability, IEEE Transactions on, 41(1), 21-25.

Konak, A., Coit, D. W., & Smith, A. E. (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. Reliability Engineering & System Safety, 91(9), 992-1007.

Kuo, Y., & Chang, Z. A. (2007). Integrated production scheduling and preventive maintenance planning for a single machine under a cumulative damage failure process. Naval Research Logistics (NRL), 54(6), 602-614.

Leng, K., Ren, P., & Gao, L. (2006). A novel approach to integrated preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine using the chaotic particle swarm optimization algorithm. Paper presented at the Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on.

Lu, Z., Cui, W., & Han, X. (2015). Integrated production and preventive maintenance scheduling for a single machine with failure uncertainty. Computers & Industrial Engineering, 80, 236-244.

Manzini, R., Accorsi, R., Cennerazzo, T., Ferrari, E., & Maranesi, F. (2015). The scheduling of maintenance. A resource-constraints mixed integer linear programming model. Computers & Industrial Engineering, 87, 561-568.

Manzini, R., Regattieri, A., Pham, H., & Ferrari, E. (2009). Maintenance for industrial systems: Springer Science & Business Media.

Moghaddam, K. S. (2013). Multi-objective preventive maintenance and replacement scheduling in a manufacturing system using goal programming. International Journal of Production Economics, 146(2), 704-716.

Moghaddam, K. S., & Usher, J. S. (2010). Optimal preventive maintenance and replacement schedules with variable improvement factor. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 16(3), 271-287.

Moghaddam, K. S., & Usher, J. S. (2011). Sensitivity analysis and comparison of algorithms in preventive maintenance and replacement scheduling optimization models. Computers & Industrial Engineering, 61(1), 64-75.

Pan, E., Liao, W., & Xi, L. (2010). Single-machine-based production scheduling model integrated preventive maintenance planning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 50(1-4), 365-375.

Regattieri, A., Manzini, R., & Battini, D. (2010). Estimating reliability characteristics in the presence of censored data: A case study in a light commercial vehicle manufacturing system. Reliability Engineering & System Safety, 95(10), 1093-1102.

Sherwin, D. (2000). A review of overall models for maintenance management. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 6(3), 138-164.

Sortrakul, N., & Cassady, C. R. (2007). Genetic algorithms for total weighted expected tardiness integrated preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 13(1), 49-61.

Sortrakul, N., Nachtmann, H. L., & Cassady, C. R. (2005). Genetic algorithms for integrated preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine. Computers in Industry, 56(2), 161-168.

Tiwari, R., Dharmar, S., & Rao, J. (1987). Fuzzy goal programmingˇ an additive model. Fuzzy sets and systems, 24(1), 27-34.

Xiang, Y., Cassady, C. R., Jin, T., & Zhang, C. W. (2014). Joint production and maintenance planning with machine deterioration and random yield. International Journal of Production Research, 52(6), 1644-1657.

Xu, B., Han, X., Wang, Y., & Sun, D. (2012). Risk-based optimization model for system maintenance scheduling. Paper presented at the Power System Technology (POWERCON), 2012 IEEE International Conference on.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and control, 8(3), 338-353.

Zhang, T., & Nakamura, M. (2005). Reliability-based Optimal Maintenance Scheduling by Considering Maintenance Effect to Reduce Cost. Quality and Reliability Engineering International, 21(2), 203-220.

Zimmermann, H.-J. (1978). Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. Fuzzy sets and systems, 1(1), 45-55.