

بهینه‌سازی برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه سیستم سری-موازی: مطالعه موردی سیستم تغذیه آب بویلرهای نیروگاه برق

علی حیدری

کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران A.heydari00@yahoo.com

محمود شهرخی*

(نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران shahrokhi292@yahoo.com

چکیده: در این پژوهش، یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه قابلیت اطمینان-محور برای یک سیستم صنعتی، با قطعات سری-موازی توسعه داده شده است. در این مدل هزینه‌های نگهداری و هزینه‌های خرابی لحاظ شده‌اند. به این ترتیب، این مدل انجام عملیات سرویس پیشگیرانه را با هدف افزایش سطح قابلیت اطمینان با کمترین هزینه کل برنامه‌ریزی می‌کند. مدل ارائه شده به صورت برنامه‌ریزی صفر و یک غیرخطی بوده و یک مثال عددی نیز برای آن حل شده است و نتایج مورد بحث قرار گرفته‌اند. برای حل مدل ارائه شده از روش محدودیت افسیلون تکامل یافته توسط نرم‌افزار GAMS استفاده شده و جواب‌های پارتویی تولید شده مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش تاثیر برنامه‌ریزی سرویس‌های پیشگیرانه بر نرخ خرابی و قابلیت اطمینان سیستم را نشان می‌دهد. این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات سیستم‌های صنعتی با هدف حداقل کردن توقفات آن‌ها، با کمترین هزینه به کار روند.

واژگان کلیدی: بلوک دیاگرام، قابلیت اطمینان، نگهداری پیشگیرانه، برنامه‌ریزی چندهدفه، نگهداری و تعمیرات قابلیت اطمینان محور.

۱- مقدمه

اصلاحی تنها زمانی انجام می‌شوند که یک ماشین خراب شود و هیچگونه مداخله‌ای وجود ندارد تا زمانی که شکست رخ دهد [۳]. در حالیکه نگهداری پیشگیرانه مجموعه‌ای از وظایف انجام شده به صورت متناوب در بازه‌های زمانی، مقدار تولید و شرایط ماشین است که عمر یک دارایی را افزایش داده یا حالت بحرانی یک دارایی را تشخیص می‌دهد [۴].

صنایع راهبردی نظیر نیروگاه‌ها که بزرگ و پیچیده بوده از تجهیزات خود برای دوره‌های طولانی بدون توقف بهره‌برداری می‌کنند. هر گونه خرابی در این صنایع بسیار

نگهداری و تعمیرات تجهیزات عمر آن‌ها را افزایش داده، قابلیت دسترسی را بهبود بخشیده و تجهیزات را در وضعیت مناسب قرار می‌دهد. در مقابل نگهداری و تعمیرات نامناسب، ممکن است سبب خرابی متعدد تجهیزات، به کارگیری ضعیف آنها، تاخیر در زمانبندی تولید و بد کارکردن تجهیزات و در نتیجه تولید دورریز یا محصولاتی با کیفیت نامناسب گردد [۱].

فعالیت‌های نت بر اساس زمانی به دو دسته کلی نگهداری اصلاحی و پیشگیرانه تقسیم‌بندی می‌شوند [۲]. تعمیرات

* (Corresponding author): shahrokhi292@yahoo.com

نتایج آن با یک نگاه جدید با مسئله برنامه‌ریزی نگهداری-و تعمیرات تلفیق شده است، آنگاه مسئله از روش دقیق محدودیت اپسیلون تکامل یافته با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شده و نتایج آن با هم مقایسه شده‌اند. آنگاه با انجام تحلیل حساسیت بر روی متغیرهای مدل می‌توان تحلیل جامعی از اثر تغییر متغیرهای مدل بر روی پاسخ بهینه مسئله انجام شده است.

۲- پیشینه پژوهش

در این قسمت ادبیات موضوع با تاکید بر پژوهش‌های انجام شده درباره قابلیت اطمینان و نگهداری و تعمیرات ارائه می‌گردد:

نورالفتح^۴ و همکاران [۵]، مسأله بهینه‌سازی ساختار یک سیستم سری-موازی^۵ چندحالتی^۶ (MSS) با سیاست تعمیر مشخص را در نظر گرفتند. آن‌ها در پژوهش خود مدلی برای بهینه کردن افزونگی با محدودیت‌های قابلیت اطمینان، هزینه‌های پیاده‌سازی و نگهداری گسترش دادند. سیستم‌های چندحالتی ممکن است عملکردی بین عملکرد کامل و شکست کامل داشته باشند. در مدل آن‌ها، سیستم شامل n گروه موازی است که به صورت سری قرار دارند. هر گروه دارای هزینه، عملکرد، نرخ خرابی و نرخ تعمیر مشخص می‌باشند. مشخصه این پژوهش در نظر گرفتن محدودیت منابع تعمیر است. مارسگورا^۷ و همکاران [۶]، این کار را با استفاده از معیار پارتو، به صورت رویکرد چندمعیاره^۸ گسترش دادند. آن‌ها از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی و از شبیه‌سازی برای ارزیابی کیفیت جواب‌ها استفاده کردند. فینکلستین^۹ [۷]، مدل موجودی قطعات یدکی برای سیستم‌های افزونگی با قطعات تعمیرنشده را با فرض مجاز بودن اشتراک قطعه یدکی ایجاد کرد. لویتین^{۱۰} و همکاران [۸]، یک مدل برای تعیین ورژن‌های بهینه اجزا و افزونگی زیرسیستم‌های مختلف در سیستم‌های سری-موازی چندحالتی ارائه دادند. همچنین برای سیستم‌های سری-موازی چندحالتی یک روش بهینه‌سازی مشترک قابلیت اطمینان و افزونگی توسط تیان^{۱۱} و همکاران [۹]، ارائه شده است که در آن حالت‌های توزیع اجزا متأثر از نرخ‌های تبدیل و افزونگی به عنوان

پرهزینه بوده و از این‌رو پیاده‌سازی راهبردهای نگهداری و تعمیرات هوشمندانه همچون رویکرد نگهداری و تعمیرات قابلیت اطمینان محور در این صنایع ضروری است.

پرسش این پژوهش چگونگی بهینه‌سازی برنامه‌ریزی سرویس‌های نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان در یک سیستم سری-موازی دارای افزونگی تعمیرپذیر و قابل-نگهداری است. روش ارائه شده به طور نمونه برای قسمت‌های اصلی سیستم تغذیه آب (FWS^۱) بویلرهای بازیاب حرارت (HRSG^۲) حل می‌شود. این بویلرها در نیروگاه‌های حرارتی ترکیبی استفاده می‌شوند.

به همین منظور یک مدل ریاضی چندهدفه براساس مفاهیم سرویس‌های پیشگیرانه، تعمیرات اصلاحی، توقف تولید و قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن محدودیت‌های اجرایی (عملیاتی/ فیزیکی) توسعه داده شده است. سرویس-های نگهداری و تعمیرات اصلاحی به عنوان فعالیت‌های بعد از رخداد خرابی تعریف شده و با توجه به تاثیر سرویس‌های پیشگیرانه بر روی نرخ خرابی و قابلیت اطمینان هر یک از مجموعه قطعات سیستم، نوع و توالی فعالیت‌های مذکور برای هر مجموعه قطعات در هر دوره در طول افق برنامه-ریزی مشخص می‌شود.

در این پژوهش بهترین استراتژی نگهداری و تعمیرات بر مبنای الگوی نگهداری و تعمیرات قابلیت اطمینان-محور، با هدف مینیمم کردن هزینه کل و افزایش قابلیت اطمینان انتخاب می‌شود. به این ترتیب ضمن کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات ثمربخشی آن نیز افزایش می‌یابد که در نتیجه توقفات ناگهانی (برنامه‌ریزی نشده) کاهش و بهره‌وری افزایش می‌یابد. متغیرهای مسئله مربوط به انتخاب انواع فعالیت‌های پیشگیرانه و زمانبندی اجرای آن‌ها هستند. برای اینکار منابع و محدودیت‌های نگهداری و تعمیرات، حساسیت سیستم‌ها و اثر نگهداری و تعمیرات بر قابلیت اطمینان آن‌ها برای تهیه برنامه زمان‌بندی لحاظ شده است. مدل بلوک دیاگرام (RBD^۳) سیستم مورد نظر ترسیم و

⁷ Marseguerra M

¹⁰ Multi Criteria Approach

⁹ Finkelstein M

¹⁰ Levitin

¹¹ Tian

¹ Feed-Water System

² Heat Recovery Steam Generator

³ Reliability Block Diagram

⁴ Nourelfath

⁵ Series-Parallel

⁶ Multi State Systems

سطح قابلیت اطمینان بکار گرفته و قابلیت اطمینان دستگاه‌ها را به طور مداوم پایش می‌کند، سپس با توجه به وضعیت آنان از دو نوع استراتژی نگهداری اصلاحی و نگهداری پیشگیرانه جهت حفظ دستگاه استفاده می‌کند. بنابراین هدف این مسئله حفظ قابلیت اطمینان سیستم بدون در نظر گرفتن هزینه می‌باشد. پیچیدگی بالا این مسئله باعث شده از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده شود که شامل بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی و الگوریتم ژنتیک می‌باشد. مسلمی^۹ و همکاران [۱۶]، از برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت استفاده و یک مدل مارکوف مبتنی بر دانش برای مسئله برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات غیرمتناوب طراحی کردند که بر مبنای آن شش نوع برنامه نگهداری و تعمیرات با مدل مارکوف معادل خود برای هر حالت معرفی کردند. آن‌ها الگوریتمی را برای همزمان‌سازی استراتژی‌های حاصل از تحلیل مبتنی بر حالت ارائه کرده و از الگوریتم جستجوی کامل برای پیدا کردن نرخ بهینه بازرسی و تعمیرات و نگهداری و تعیین بهترین استراتژی استفاده کردند که سبب کاهش هزینه گردید. پورمحمدی^{۱۰} و همکاران [۱۷]، یک روش کارآمد برای ارزیابی حساسیت جزئی قابلیت اطمینان کل سیستم، نگهداری و تعمیرات قابلیت اطمینان-محور ارائه کردند. روش ارائه شده برای تعیین نسبت سهم هر یک از تجهیزات به عملکرد قابلیت اطمینان کل سیستم قدرت، با استفاده تئوری بازی به کار رفته است. سپس اجزای مهم شناسایی شده به طور سیستماتیک در چارچوب بهینه‌سازی جدید برای برنامه‌ریزی اجرای موثر RCM در سیستم‌های قدرت دخالت داده شدند. کالوم^{۱۱} و همکاران [۱۸]، چارچوبی برای برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری مبتنی بر ریسک RBM را ارائه داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که رویکردهای برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری موجود (RCM-PM) برای در دسترس بودن و نگهداری و تعمیرات ناوهای دریایی و کشتی‌ها به دلیل افزایش هزینه‌ها بهینه نیست و از این‌رو با توسعه برنامه‌ای در چارچوب برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری مبتنی بر ریسک باعث کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات با وضعیت در دسترس بودن شدند. امیری^{۱۲} و همکاران [۱۹]، موضوع قابلیت اطمینان و هزینه را

متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده است. کاسترو^۱ و همکاران [۱۰]، یک رویکرد بهینه‌سازی دسترسی‌پذیری را برای سیستم‌های سری با اجزای افزونه و منابع نگهداری و تعمیرات اصلاحی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه کردند. گاببار^۲ و همکاران [۱۱]، یک فرآیند بهبود یافته (RCM^۳) را در محیط اتوماتیک به عنوان مجتمع (CMMS^۴) ارائه دادند. اجزای اصلی از فرایند (RCM) افزایش یافته مشخص می‌شود و یک نمونه اولیه به عنوان مجتمع با ماژول‌های مختلف از (CMMS) اجرا می‌شود. وسیلز^۵ [۱۲]، روش بهینه‌سازی هزینه‌های یک دوره تعمیر و نگهداری را ارائه می‌دهد که در آن از هزینه‌ها به عنوان محدودیت استفاده شده که به وسیله آن یک سازمان را قادر می‌شود تا یک برنامه جامع RCM را به طور موثر پیاده سازی کند. سهو^۶ و همکاران [۱۳]، با استفاده از روش آنالیز و شناسایی تمامی حالت‌های خرابی تجهیزات یک سیستم و تاثیرات آن بر عملکرد سیستم، نگهداری و تعمیرات تجهیزات بحرانی را بهینه کردند. هدف آن‌ها محاسبه قابلیت اطمینان، اولویت ریسک و طبقه‌بندی آن و انتخاب روش مناسب نگهداری است. بنابراین اجرای این رویکرد، سهم خود را در کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات نشان می‌دهد. با استفاده از این روش، وظایف بحرانی برای سیستم مشخص شده و الزامات قابلیت اطمینان برای آن‌ها با روش دقیق شناسایی می‌شود. وانگ و لیو^۷ [۱۴]، با هدف بهبود دسترسی‌پذیری و توان عملیاتی سیستم یک مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی چندهدفه با دو نوع منابع محدود ماشین‌آلات و قالب‌ها؛ فعالیت نگهداری پیشگیرانه منعطف بر روی منابع را بررسی کردند. در این پژوهش هر کار فقط با یک ماشین و یک قالب انجام می‌گیرد و خرابی هر یک از ماشین‌آلات و قالب‌ها با توزیع نمایی است. از روش متاهوریستیک چندهدفه توسعه یافته مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای زمان‌بندی همزمان تولید و نگهداری پیشگیرانه استفاده شده است. رحمتی^۸ و همکاران [۱۵]، مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی با اجزای تصادفی را با سیستم نگهداری و تعمیرات مدرن RCM توسعه دادند. آن‌ها مدلی ارائه کردند که در آن استراتژی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت را برای پایش

⁷ Wang & Liu

⁸ Rahmati

⁹ Moslemi

¹⁰ Pourahmadi

¹¹ Cullum

¹² Amiri

¹ Castro

² Gabbar

³ Reliability centered maintenance

⁴ Computerized maintenance management system

⁵ Wessels

⁶ Sahoo

پژوهش طبق سیاست نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر عمر، سیستم هنگام خرابی یا قبل از خرابی جایگزین می‌شود و تعداد اجزای خراب در زمان تعویض یک متغیر تصادفی است. همچنین سیستم مورد مطالعه باینری در نظر گرفته شده و از اجزای وابسته دارای نرخ خرابی ثابت تشکیل شده‌اند. حمدان^۵ و همکاران [۲۴]، مدل‌های بهینه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه را برای سیستم‌های وزنی سری-موازی k-out-of-n بر اساس معیارهای متوسط هزینه و دسترسی معرفی کردند. در این پژوهش مثالی برای بهینه‌سازی هزینه و دسترسی سیستمی با ۱۵ اجزا حل شده که در آن صرف‌نظر از وزن اجزا هزینه تعمیر اجزای خراب برای همه یکسان در نظر گرفته شده است. بیشت و سینگ^۶ [۲۵]، یک سیستم چندحالتی سری-موازی تعمیرپذیر را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش برای ارزیابی قابلیت‌اطمینان سیستم از رویکرد IUF^۷ استفاده کردند. در این رویکرد پیچیدگی محاسبات قابلیت اطمینان به شدت کاهش یافته است. همچنین در مدل ارائه شده، احتمال قرار گرفتن هر قطعه در وضعیت‌های مختلف، قابلیت اطمینان سیستم و میانگین زمان بین دو خرابی به کمک زنجیره مارکوف محاسبه شده است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده تاکنون مطالعه‌ای برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه سیستم سری-موازی مبتنی بر قابلیت اطمینان با رویکرد بلوک دیاگرام براساس مدل‌سازی ریاضی و با در نظر گرفتن هزینه تعمیر و تولید از دست رفته انجام نشده است. علاوه بر این، مقاله حاضر بیان‌کننده بهینه‌سازی برنامه تعمیرات پیشگیرانه قابلیت اطمینان-محور برای سیستم تغذیه آب بویلر HRSG است که در نیروگاه برق به کار می‌رود و با در نظر گرفتن ساختار ویژه آن‌ها انجام شده است.

۳- بیان مساله

مسئله موردنظر در این پژوهش بهینه‌سازی برنامه نگهداری و تعمیرات یک سیستم تغذیه آب بویلرهای HRSG می‌باشد. بلوک دیاگرام ساده شده این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزاء اصلی این سیستم به صورت سری-موازی قرار گرفته‌اند و مجموعه‌های ۱ و ۲ مربوط به پمپ‌های تغذیه آب به همراه

برای سیستم هاب انرژی در نظر گرفته‌اند. در تابع هدف مربوط به هزینه، برنامه‌ریزی هاب انرژی و برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات را بصورت یکپارچه ارائه دادند. نوع تجهیزات هاب انرژی قابل تعمیر و تعویض هستند که در اقدامات نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بمنظور حل مدل از روش اپسیلون محدودیت استفاده شده است. همچنین برای نرخ خرابی و طول عمر تجهیزات، توزیع گاما و وایبل در نظر گرفته شده است. شایسته^۱ و همکاران [۲۰]، بهینه‌سازی تعمیرات و نگهداری سیستم برق را با یکپارچه کردن منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه دادند. آن‌ها با استفاده استراتژی‌های تعمیرات و نگهداری (تعداد ژنراتورها و میزان بارگزاری) در سیستم چندوضعیتی بهترین استراتژی ممکن برای کاهش هزینه را انتخاب کردند. تابع هدف در نظر گرفته شده در این پژوهش از نوع هزینه است که هزینه‌های عملیات، وقفه و زیست‌محیطی را مد نظر قرار داده است. حل مدل با استفاده از روش شبیه‌سازی انجام شده است. سای^۲ و همکاران [۲۱]، الگوریتمی برای برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر دسترسی‌پذیری ارائه داده و با در نظر گرفتن سه نوع فعالیت نگهداری شامل سرویس مکانیکی، تعمیر و تعویض تجهیزات برای یک سیستم چندجزئی، دسترسی‌پذیری سیستم را پیشنهاد کردند. همچنین در این پژوهش برای محاسبه نرخ خرابی و قابلیت‌اطمینان از توزیع وایبل استفاده شده است. در این پژوهش نشان داده شده که استفاده از سه عامل نگهداری بیشترین تاثیر را در کاهش هزینه نگهداری و افزایش دسترسی-پذیری دارد. لی^۳ و همکاران [۲۲]، یک رویکرد جدید برای ادغام نگهداری پیشگیرانه در برنامه‌ریزی تولید از یک سیستم تولید پیچیده بر اساس در دسترس بودن و هزینه پرداخته‌اند. بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های تاریخی، دوره‌های فرصت‌طلب برای اجرای وظایف نگهداری پیشگیرانه محاسبه می‌شوند تا تأثیر کمتری بر تولید داشته و فاصله و مدت نگهداری پیشگیرانه را بدست آورند. همچنین در این مطالعه از طریق الگوریتم بهینه‌سازی کلنی مورچگان، برنامه‌ریزی زمان‌بندی و کمترین تعداد پرسنل نگهداری را به دست می‌آورند. اریلماز^۴ [۲۳]، نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر عمر را برای یک سیستم باینری که از مولفه‌های نمایی مستقل تشکیل شده ارائه می‌دهد و سپس برای سیستم‌های متوالی k-out-of-n نیز تعمیم می‌دهند. در این

⁵ Eryilmaz

⁶ Bisht, & Singh

⁷ Interval universal generating function

¹ Shayesteh

² Tsai

³ Li

⁴ Eryilmaz

مفروض اول به معنای ثابت بودن نوع خرابی است که فقط یک خرابی برای هر مجموعه در نظر گرفته شده است. این فرض به منظور ساده‌سازی در نظر گرفته شده است.

در مفروض دوم اگر چه زمان تعمیر یک متغیر تصادفی می‌باشد و تابع عوامل متفاوتی است، ولی در این مسئله برای سادگی ثابت و مشخص در نظر گرفته شده است.

مفروض سوم مربوط به محدود بودن تعداد سرویس‌های دوره‌ای مشخص برای هر یک از مجموعه‌ها است که با واقعیت انطباق دارد.

مفروض چهارم با توجه به اینکه معمولاً زمان سرویس‌های دوره‌ای کوتاه بوده و در بسیاری از موارد نیاز به توقف تولید در حین انجام آن‌ها نمی‌باشد، در نظر گرفته شده است. این مفروض برای امکان استفاده از توزیع پواسون برای نرخ خرابی مجموعه‌ها ضروری است.

مفروض پنجم انواع سرویس دوره‌ای بر روی هر یک از مجموعه‌ها را به یک نوع محدود می‌کند که به منظور ساده‌سازی در نظر گرفته شده است.

مفروض ششم به معنای مستقل بودن زمان تعمیرات اصلاحی هر مجموعه (در صورت خرابی) از زمان سرویس دوره‌ای همان مجموعه است. این مفروض در بسیاری از موارد با واقعیت انطباق دارد زیرا زمان خرابی بیش از هر چیز به نوع خرابی وابسته است. این مفروض برای امکان استفاده از توزیع پواسون برای نرخ خرابی مجموعه‌ها ضروری است.

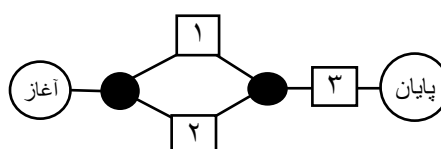
در مفروض هفتم نوع سرویس‌های دوره‌ای انتخاب‌شده برای مجموعه‌ها (از جمله مجموعه‌های ۱ و ۲) ثابت نیست و در صورت نیاز می‌تواند متفاوت باشد.

مفروض هشتم با توجه عدم محدودیت در برون‌سپاری انجام سرویس‌های نگهداری در نظر گرفته شده است.

مفروض نهم به معنای ثابت بودن نرخ خرابی مجموعه‌ها و به عبارت دیگر امکان استفاده از توزیع پواسون برای محاسبه احتمال هر تعداد خرابی در دوره زمانی مشخص می‌باشد.

در ابتدا مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تعریف شده است و سپس مدل ریاضی معرفی خواهد شد.

متعلقات آن (شامل سیستم ابزار دقیق و شیرهای کنترل) می‌باشند. سیستم تغذیه آب با وجود کارکرد حداقل یکی از این دو مجموعه به کار خود ادامه می‌دهد. ولی مجموعه ۳ که مربوط به قطعات کنترل و ابزار دقیق است، جایگزینی نداشته و با خرابی آن سیستم متوقف خواهد شد. فرض بر آن است که عملیات نگهداری توسط پیمانکاران انجام شده و به همین دلیل در ازاء پرداخت هزینه متناسب، محدودیتی بر حجم این عملیات وجود ندارد. هدف این مسئله یافتن بهترین گزینه‌ها برای انجام تعمیرات پیشگیرانه برای هر یک از زیرمجموعه‌ها، بر مبنای اثر انجام آنها بر قابلیت اطمینان و به تبع آن هزینه کل سیستم است. در این مسئله انواع تعمیرات برای هر زیرمجموعه به دو صورت سرویس نگهداری پیشگیرانه و تعمیرات اصلاحی تقسیم شده‌اند.



شکل ۱: دیاگرام بلوکی سیستم مورد مطالعه

۳-۱- مفروضات مساله

۱. هر مجموعه فقط یک نوع خرابی دارد.
۲. زمان تعمیر هر مجموعه مشخص است.
۳. تعداد حالات ممکن برای انجام سرویس دوره‌ای محدود و مشخص است.
۴. زمان سرویس‌های دوره‌ای ناچیز بوده و نسبت به طول کل دوره قابل صرف‌نظر کردن است.
۵. برای سرویس‌های دوره‌ای هر مجموعه گزینه‌های متفاوتی وجود دارد ولی تنها یکی از آن‌ها قابل انتخاب است.
۶. زمان تعمیرات اصلاحی مجموعه مستقل از فعالیت پیشگیرانه انجام شده بر روی آن است.
۷. نوع عملیات نگهداری پیشگیرانه انتخاب شده برای مجموعه‌ها می‌تواند متفاوت باشد.
۸. حجم عملیات نگهداری سیستم محدودیتی ندارد.
۹. نرخ خرابی (و در نتیجه قابلیت اطمینان) مجموعه‌ها وابسته به نوع نگهداری پیشگیرانه بوده و در فاصله بین دو نگهداری متوالی ثابت می‌باشد.

۳-۲- علائم و نمادهای ریاضی مسئله

و چون تابع توزیع احتمال خرابی از نوع تابع پواسون می‌باشد، چنانچه قطعه آم توسط سرویس پیشگیرانه آم نگهداری شود آنگاه قابلیت اطمینان آن برابر خواهد بود با:

$$P_i(0) = \sum_{j=1}^{j_i} y_{ij} e^{-\lambda_{ij}} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

و با توجه به اینکه زمان مورد بررسی یکسال می‌باشد و $t=1$ بنابراین رابطه فوق به صورت زیر خواهد بود:

$$P_i(0) = \frac{(\lambda_{ij})^0 e^{-\lambda_{ij} t}}{0!} \quad (4)$$

و یا

$$P_i(0) = e^{-\lambda_{ij}} \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

به این ترتیب مدل برنامه‌ریزی ریاضی مسئله به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{j_i} \left[(y_{ij} C_{ij}^p) + \right. \\ &\left. \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{y_{ij} \theta_{ij}} P_i(k) k (C_i^r + T_i^r P_i^{S \odot} C_s) \right] \\ &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{j_i} [(y_{ij} C_{ij}^p)] + \\ &\sum_{k=1}^{\infty} \sum_i (P_i(k) k C_i^r) \sum_j \frac{1}{y_{ij} \theta_{ij}} + \\ &\sum_{k=1}^{\infty} \sum_i \sum_j \left(\frac{1}{y_{ij} \theta_{ij}} P_i(k) k \right) T_i^r P_i^{S \odot} C_s \\ \Rightarrow Z_1 &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{j_i} [(y_{ij} C_{ij}^p)] + \\ &\sum_{k=1}^{\infty} \sum_i \left(\frac{1}{\theta_i} P_i(k) k (C_i^r + T_i^r P_i^{S \odot} C_s) \right) \\ \Rightarrow Z_1 &= \sum_{i=1}^I C_i^p + \sum_{k=1}^{\infty} P_i(k) k \sum_i \left(\frac{1}{\theta_i} (C_i^r + \right. \\ &\left. T_i^r P_i^{S \odot} C_s) \right) \quad (6) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow Z_1 = \sum_{i=1}^I C_i^p + \sum_i E_i[k] \left(\frac{1}{\theta_i} (C_i^r + T_i^r P_i^{S \odot} C_s) \right)$$

$$\Rightarrow Z_1 = \sum_{i=1}^I C_i^p + \sum_i \lambda_i \theta_i \left(\frac{1}{\theta_i} (C_i^r + T_i^r P_i^{S \odot} C_s) \right)$$

$$\Rightarrow Z_1 = \sum_{i=1}^I C_i^p + \sum_i \lambda_i (C_i^r + T_i^r P_i^{S \odot} C_s)$$

$$Z_1 = \sum_{i=1}^I C_i^p + \sum_i \left(\sum_{j=1}^{j_i} y_{ij} \lambda_{ij} \right) C_i^r + \sum_i \left(\sum_{j=1}^{j_i} P_s y_{ij} \lambda_{ij} \right) T_i^r C_s$$

الف- مجموعه‌ها

i : تعداد مجموعه‌ها

j : نوع سرویس پیشگیرانه

ب- پارامترها

C_{ij}^p : هزینه انجام سرویس دوره‌ای نوع j روی مجموعه i ام
 $j = 1, 2, 3, \dots, j_i$

θ_{ij} : فاصله زمانی بین دو نگهداری پیشگیرانه اگر برای مجموعه i از نگهداری نوع j استفاده شود.

λ_{ij} : نرخ خرابی مجموعه i ام اگر سرویس نگهداری نوع j ام روی آن انجام شود

C_i^r : هزینه تعمیر اصلاحی مجموعه i ام اگر خراب شود

j_i : تعداد حالات ممکن برای انجام عملیات نگهداری پیشگیرانه برای مجموعه i

T_i^r : زمان تعمیر اصلاحی مجموعه i

C_s : هزینه توقف تولید ناشی از خرابی سیستم در واحد زمان

ج- متغیرها

Y_{ij} : اگر سرویس دوره‌ای j ام روی مجموعه i ام انتخاب شود برابر یک در غیر این صورت برابر صفر.

R_i : قابلیت اطمینان مجموعه i ام $i=1, 2, 3, \dots, I$

R_s : قابلیت اطمینان کل سیستم

P_i^S : احتمال اینکه خرابی مجموعه i ام باعث توقف شود

$P_i(k)$: احتمال رخداد k خرابی برای مجموعه i ام در فاصله زمانی بین دو سرویس پیشگیرانه

۴- مدل ریاضی مسئله

قابلیت اطمینان کل سیستم از روی قابلیت اطمینان اجزاء آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_s = (R_1(1 - R_2) + (1 - R_1)R_2 + R_1R_2)R_3 \quad (1)$$

با توجه به اینکه قابلیت اطمینان یک قطعه برابر احتمال خراب نشدن آن و یا به عبارت دیگر احتمال رخداد صفر خرابی برای آن است، بنابراین خواهیم داشت:

$$R_i = P_i(0) \quad (2)$$

$$P_i^{S\odot} = \min(P_i^S, 1) \quad \forall i \quad (13)$$

$$T_i^r \leq \theta_i \quad \forall i \quad (14)$$

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^{j_i} y_{ij} \lambda_{ij} \quad \forall i \quad (15)$$

$$\theta_i = \sum_{j=1}^{j_i} y_{ij} \theta_{ij} \quad \forall i \quad (16)$$

$$C_i^p = \sum_{j=1}^{j_i} y_{ij} C_{ij}^p \quad \forall i \quad (17)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad (18)$$

رابطه (۶) تابع هدف مسئله است که امید ریاضی هزینه‌های کل سیستم شامل هزینه نگهداری پیشگیرانه، توقف تولید و انجام تعمیرات اصلاحی را کمینه می‌کند. در میان این هزینه‌ها، هزینه‌های توقف تولید و انجام تعمیرات اصلاحی تصادفی هستند که با توجه به احتمال آن‌ها، میانگین دفعات رخداد آن‌ها محاسبه و در رابطه (۲) لحاظ شده است.

رابطه (۷) قابلیت اطمینان کل بلوک دیاگرام شکل ۱ را با توجه به احتمال خراب نشدن (قابلیت اطمینان) قطعات ۱، ۲ و ۳، با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌کند.

رابطه (۸) نوع سرویس دوره‌ای انتخابی را بر روی مجموعه آم را به یک نوع محدود می‌سازد.

رابطه (۹) با استفاده از توزیع پواسون احتمال k رخداد خرابی را برای هر یک از مجموعه‌ها با توجه به نوع سرویس انجام شده بر روی آن، مشخص می‌کند.

رابطه (۱۰) مشخص می‌کند که خرابی مجموعه ۳ قطعاً (با احتمال ۱) منجر به توقف سیستم می‌شود.

رابطه (۱۱) احتمال توقف سیستم را در صورت خرابی زیرمجموعه ۱ نشان می‌دهد. این احتمال براساس نسبت دسترسی پذیری مجموعه ۲ محاسبه می‌شود. دلیل این امر آن است که در صورتی خرابی مجموعه ۱ منجر به توقف کل سیستم می‌گردد که پیش از آن مجموعه ۲ خراب شده باشد. این احتمال با دانستن اینکه

$$\begin{aligned} \text{Max } Z_2 &= (R_1(1 - R_2) + (1 - R_1)R_2 + R_1R_2)R_3 \\ \text{Max } Z_2 &= (P_1(0)(1 - P_2(0)) + (1 - P_1(0))P_2(0) \\ &\quad + P_1(0)P_2(0))P_3(0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Max } Z_2 &= (\sum_{j=1}^{j_1} y_{1j} e^{-\lambda_{1j}} (1 - \sum_{j=1}^{j_2} y_{2j} e^{-\lambda_{2j}}) + \\ &\quad (1 - \sum_{j=1}^{j_1} y_{1j} e^{-\lambda_{1j}}) \sum_{j=1}^{j_2} y_{2j} e^{-\lambda_{2j}} + \\ &\quad \sum_{j=1}^{j_1} y_{1j} e^{-\lambda_{1j}} \sum_{j=1}^{j_2} y_{2j} e^{-\lambda_{2j}}) \sum_{j=1}^{j_3} y_{3j} e^{-\lambda_{3j}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{j_i} y_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, 3 \dots I \quad (8)$$

$$P_i(k) = \sum_{j=1}^{j_i} y_{ij} \left[\frac{(\lambda_{ij} \theta_{ij})^k e^{-\lambda_{ij} \theta_{ij}}}{k!} \right] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, 3 \dots I \\ k &= 1, 2, 3 \dots \infty \end{aligned}$$

$$P_3^S = 1 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P_1^S &= \sum_{k=0}^{\infty} P_2(k) \frac{k T_2^r}{\sum_{j=1}^{j_2} y_{ij} \theta_{2j}} = \\ &= \frac{T_2^r}{\sum_{j=1}^{j_2} y_{ij} \theta_{2j}} (\sum_{k=0}^{\infty} P_2(k) k) \\ &= \frac{T_2^r}{\sum_{j=1}^{j_2} y_{ij} \theta_{2j}} E_2[k] = \frac{T_2^r}{\theta_2} E_2[k] \\ &= \frac{T_2^r}{\theta_2} (\lambda_2 \theta_2) = \lambda_2 T_2^r \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} P_2^S &= \sum_{k=0}^{\infty} P_1(k) \frac{k T_1^r}{\sum_{j=1}^{j_1} y_{1j} \theta_{2j}} = \\ &= \frac{T_1^r}{\sum_{j=1}^{j_1} y_{1j} \theta_{2j}} \sum_{k=0}^{\infty} P_1(k) k \\ \Rightarrow P_2^S &= \sum_{k=0}^{\infty} P_1(k) \frac{k T_1^r}{\sum_{j=1}^{j_1} y_{1j} \theta_{2j}} \\ &= \frac{T_1^r}{\sum_{j=1}^{j_1} y_{1j} \theta_{2j}} E_1[k] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{j=1}^{j_2} y_{1j} (T_1^r \lambda_{1j}) \\ &= \lambda_1 T_1^r \end{aligned}$$

$$Z_1 = \sum_{i=1}^I C_i^p + \sum_i \left(\sum_{j=1}^{j_i} y_{ij} \lambda_{ij} \right) C_i^r + \sum_i \left(\sum_{j=1}^{j_i} P_{Sj} y_{ij} \lambda_{ij} \right) T_i^r C_s \quad (23)$$

در اینجا ضرب دو متغیر $P_i^{S\odot}$ و y_{ij} باعث غیر خطی شدن تابع هدف اول می‌شود که با افزودن محدودیت‌های زیر، مدل خطی می‌شود. اگر M به اندازه کافی بزرگ باشد روابط زیر صحیح می‌باشد.

$$P_S y_{ij} \leq M^* y_{ij}$$

$$P_S y_{ij} \leq P_{Si}$$

$$P_S y_{ij} \geq P_{Si} - (1 - y_{ij})^* M$$

۴-۲- نحوه خطی‌سازی تابع هدف دوم:

قابلیت اطمینان سیستم را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$R_s = (R_1 + R_2 - R_1 R_2) R_3 \\ = R_1 R_3 + R_2 R_3 - R_1 R_2 R_3$$

با جایگذاری فرمول‌های قابلیت اطمینان هر یک از اجزا خواهیم داشت:

$$R_s = \sum_{ja=1}^{j_1} \sum_{jc=1}^{j_3} y_{1ja} y_{3jc} e^{-\lambda_{1ja}} e^{-\lambda_{3jc}} \\ + \sum_{jb=1}^{j_2} \sum_{jc=1}^{j_3} y_{2jb} y_{3jc} e^{-\lambda_{2jb}} e^{-\lambda_{3jc}} \\ - \sum_{ja=1}^{j_1} \sum_{jb=1}^{j_2} \sum_{jc=1}^{j_3} y_{1ja} y_{2jb} y_{3jc} e^{-\lambda_{1ja}} e^{-\lambda_{2jb}} e^{-\lambda_{3jc}}$$

در عبارت فوق، ضرب متغیرهای باینری باعث غیرخطی شدن مدل شده است. متغیرهای جدید زیر که از نوع باینری می‌باشند را تعریف می‌کنیم بعنوان مثال متغیر $y_{21,ja,3,jc}$ بصورت باینری است اگر برای مجموعه ۱ سرویس پیشگیرانه ja و برای مجموعه ۳ سرویس پیشگیرانه نوع jc انتخاب شود ۱ در غیر اینصورت ۰ می‌شود.

$$y_{21,ja,3,jc} = y_{1ja} y_{3jc}$$

امید ریاضی تعداد توقفات قطعه ۲ در فاصله بین دو تعمیر پیشگیرانه که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد، حساب شده است:

$$E_2[k] = \sum_{j=1}^{j_2} y_{2j} \lambda_{2j} \theta_{2j} = \lambda_2 \theta_2 \quad (19)$$

رابطه (۱۲) احتمال توقف سیستم را در صورت خرابی زیرمجموعه ۲ نشان می‌دهد. این احتمال براساس نسبت دسترسی‌پذیری مجموعه ۱ محاسبه می‌شود. دلیل این امر آن است که در صورتی خرابی مجموعه ۲ منجر به توقف کل سیستم می‌گردد که پیش از آن مجموعه ۱ خراب شده باشد. این احتمال با دانستن اینکه امید ریاضی تعداد توقفات قطعه ۱ در فاصله بین دو تعمیر پیشگیرانه که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد، حساب شده است:

$$E_1[k] = \sum_{j=1}^{j_2} y_{1j} \lambda_{1j} \theta_{1j} \quad (20)$$

رابطه (۱۳) بیانگر این محدودیت منطقی است که سقف احتمال اینکه خرابی مجموعه ۱ باعث توقف شود برابر ۱ می‌باشد.

رابطه (۱۴) فاصله زمانی بین دو نگهداری پیشگیرانه مجموعه ۱ام باید از زمان تعمیر اصلاحی مجموعه ۱ بیشتر تر باشد.

رابطه (۱۵) نرخ خرابی مجموعه ۱ام را با دانستن سرویس دوره‌ای انتخابی نوع j تعیین می‌کند.

رابطه (۱۶) فاصله زمانی بین دو نگهداری پیشگیرانه مجموعه ۱ام با توجه به سرویس انتخابی دوره‌ای نوع j تعیین می‌کند.

رابطه (۱۷) هزینه انجام سرویس پیشگیرانه مجموعه ۱ام را بر اساس انتخاب سرویس دوره‌ای نوع j تعیین می‌کند.

رابطه (۱۸) متغیرهای تصمیم مسئله را از نوع صفر و یک معرفی می‌کند.

۴-۱- نحوه خطی‌سازی تابع هدف اول:

تابع هدف هزینه‌ها بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_1 = \sum_{i=1}^I C_i^p + \sum_i \lambda_i C_i^r + \sum_i \lambda_i T_i^r P_i^{S\odot} C_s \quad (22)$$

یا به عبارتی:

۵- روش پژوهش

در این بخش مفاهیم مربوط به بهینه‌سازی مدل دوهدفه به روش محدودیت افسیلون تکامل یافته توسط نرم‌افزار GAMS با حل-کننده CPLEX ارائه شده است.

روش محدودیت افسیلون در مواجهه با توابع چندهدفه شناخته شده است که یکی از توابع هدف را به‌عنوان تابع اصلی در نظر گرفته شده و توابع دیگر در محدودیت‌ها گنجانده می‌شوند که بصورت مدل ریاضی زیر نمایش داده می‌شود:

$$\begin{aligned} \min f_1(x) \\ f_2(x) \leq \varepsilon_2 \\ \dots \\ f_n(x) \leq \varepsilon_n \end{aligned} \quad (21)$$

گام‌های روش افسیلون محدودیت به صورت زیر می‌باشد:

۱. یکی از توابع به‌عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود.
۲. در هر مرحله با توجه به یکی از توابع هدف مساله را حل شده و مقادیر بهینه هر تابع هدف محاسبه می‌شود.
۳. با تقسیم بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی به تعداد مشخص یک جدول برای مقادیر به دست آورده می‌شود.
۴. مساله با تابع هدف اصلی و با در نظر گرفتن هر یک از مقادیر حل می‌شود.
۵. در نهایت جواب‌های پارتویی یافته شده گزارش می‌شود.

روش افسیلون محدودیت توسط ماوروتاس^۱ بهبود یافته که آن را با نام "روش افسیلون محدودیت تکامل یافته"^۲ معرفی می‌کند که خلاصه آن به‌صورت زیر می‌باشد.

برای به‌کارگیری روش محدودیت افسیلون تکامل یافته باید محدوده تغییرات توابع هدف محاسبه گردد. این امر حداقل برای تابع هدف که به صورت محدودیت تبدیل خواهند شد ضروری خواهد بود. بهترین مقدار هر یک از توابع هدف از بهینه‌سازی جداگانه آن با توجه به محدودیت‌های اولیه مساله به‌دست خواهد آمد، ولی محاسبه کمترین مقدار آن‌ها به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد. رایج‌ترین رویکرد در محاسبه محدوده توابع هدف استفاده از جدول موازنه می‌باشد. این جدول با استفاده از بهینه‌سازی ترتیبی و با جواب‌های پارتویی تشکیل می‌شود [۲۵].

در ادامه، کاربرد مدل با حل آن با اعداد فرضی نشان داده شده است. هزینه و زمان تعمیر مجموعه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

$$y_{2,jb,3,jc} = y_{2jb}y_{3jc}$$

$$y_{3,ja,2,jb,3,jc} = y_{1ja}y_{2jb}y_{3jc}$$

و با افزودن محدودیت‌های زیر، مدل خطی می‌شود، توجه شود که از حاصل عبارات سمت راست محدودیت‌ها جزء صحیح گرفته می‌شود تا حاصل آن‌ها به اعداد باینری تبدیل شوند که در اینصورت تمام محدودیت‌های زیر صحیح می‌باشد، به‌عنوان مثال اگر در عبارات‌های اول و دوم زیر مقدار $y_{1ja} = 1$ و $y_{3jc} = 0$ باشد آنگاه حاصل عبارت‌ها برابر ۰ می‌شود.

$$y_{2,ja,3,jc} = \left\lfloor \frac{y_{1ja} + y_{3jc}}{2} \right\rfloor$$

$$y_{2,ja,3,jc} = [(y_{1ja} + y_{3jc}) - 1]$$

$$y_{2,jb,3,jc} = \left\lfloor \frac{y_{2jb} + y_{3jc}}{2} \right\rfloor$$

$$y_{2,jb,3,jc} = [(y_{2jb} + y_{3jc}) - 1]$$

$$y_{3,ja,2,jb,3,jc} = \left\lfloor \frac{y_{1ja} + y_{2jb} + y_{3jc}}{3} \right\rfloor$$

$$y_{3,ja,2,jb,3,jc} = [(y_{1ja} + y_{2jb} + y_{3jc}) - 2]$$

بنابراین، به‌جای تابع هدف دوم، عبارات زیر باید در مدل بیابند به‌صورت زیر:

$$\begin{aligned} R_s &= \sum_{ja=1}^{j_1} \sum_{jc=1}^{j_3} y_{2,ja,3,jc} e^{-\lambda_{1ja}} e^{-\lambda_{3jc}} \\ &+ \sum_{jb=1}^{j_2} \sum_{jc=1}^{j_3} y_{2,jb,3,jc} e^{-\lambda_{2jb}} e^{-\lambda_{3jc}} \\ &- \sum_{ja=1}^{j_1} \sum_{jb=1}^{j_2} \sum_{jc=1}^{j_3} y_{3,ja,2,jb,3,jc} e^{-\lambda_{1ja}} e^{-\lambda_{2jb}} e^{-\lambda_{3jc}} \end{aligned}$$

² Augmented Epsilon Constraint Method (AUGMECON)

¹ Mavrotas

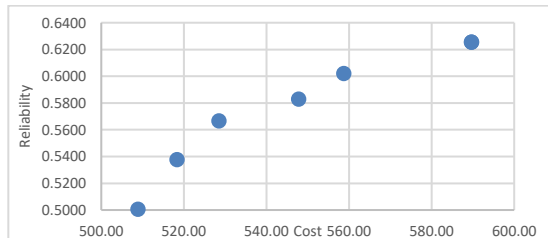
۶- حل مدل

ملاحظه می‌شود زمانی که تابع هدف اول به تنهایی بهینه‌سازی می‌شود، بهترین مقدار آن یعنی $508/82$ حاصل می‌شود و زمانی که تابع هدف دوم به تنهایی بهینه‌سازی می‌شود، بهترین مقدار آن یعنی قابلیت اطمینان $0/6253$ به دست می‌آید. اما زمانی که تابع هدف اول در بهترین وضعیت خود قرار دارد، برای تابع هدف دوم مقدار $0/5004$ به دست می‌آید و زمانی که تابع هدف دوم در بهترین وضعیت خود قرار دارد، برای تابع هدف اول مقدار $589/62$ به دست می‌آید.

پس از اجرای گام‌های الگوریتم، جواب‌های پارتویی کارا به صورت جدول ۸ به دست می‌آیند.

سه ستون انتهایی جدول، نوع تعمیر و نگهداری انتخاب شده برای هر یک از اجزا را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در جواب پارتویی شماره ۱، برای اجزای ۱ و ۲، تعمیر و نگهداری نوع ۳ انتخاب شده است و برای جزء ۳، تعمیر و نگهداری نوع ۱ انتخاب شده است. توجه شود که جواب‌های پارتویی به دست آمده، نسبت به هم نامغلوب هستند و تصمیم‌گیرنده با توجه به ترجیحات خود می‌تواند هر یک از جواب‌ها را که شامل برنامه نگهداری و تعمیرات برای اجزای سیستم است انتخاب کند.

نمودار جواب‌های پارتویی به صورت زیر است (محور افقی هزینه و محور عمودی قابلیت اطمینان سیستم را نشان می‌دهد).



شکل ۲: هزینه و قابلیت اطمینان

با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که با افزایش قابلیت اطمینان سیستم، هزینه‌های سیستم افزایش می‌یابد که این امر بیانگر تضاد میان دو هدف مسئله است. در جدول ۸ هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، هزینه‌های توقف تولید و هزینه‌های نگهداری اصلاحی برای هر کدام از جواب‌های کارا مشخص شده است، به عنوان مثال در جواب شماره ۱ هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، توقف تولید و نگهداری و تعمیرات اصلاحی به ترتیب اعداد ۲۳۰، $208/82$ و ۷۰ می‌باشد و جواب شماره ۷ به ترتیب ۳۵۰، $201/62$ و ۳۸ می‌باشد. بنابراین با مقایسه جواب‌های شماره ۱ و ۷ متوجه می‌شویم که با افزایش سرویس‌های

جدول ۱: هزینه و زمان تعمیر مجموعه‌ها

مجموعه	هزینه تعمیر	زمان تعمیر اصلاحی
۱ و ۲	۴۰	۱۱ روز
۳	۳۵	۱۸ روز

هزینه توقف تولید ۱۰۰۰ واحد در سال در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به سرویس‌های نگهداری مربوط به مثال در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به سرویس‌های نگهداری

مجموعه (۱)	نوع نگهداری پیشگیرانه (۱)	فاصله بین دو سرویس متوالی در حساب	نرخ خرابی مجموعه	هزینه کل سرویس پیشگیرانه
۱ و ۲	۱ (۳ ماهه)	$\frac{1}{4}$	۰/۳	۱۰۰
۱ و ۲	۲ (۶ ماهه)	$\frac{1}{2}$	۰/۳	۶۰
۱ و ۲	۳ (سالانه)	۱	۰/۷	۴۰
۳	۱ (۳ ماهه)	$\frac{1}{4}$	۰/۴	۱۵۰
۳	۲ (۴ ماهه)	$\frac{1}{3}$	۰/۷	۱۲۰
۳	۳ (۶ ماهه)	$\frac{1}{2}$	۰/۹	۹۰
۳	۴ (سالانه)	۱	۱/۱	۵۰

جواب‌های پارتویی کارای تولید شده حالت‌های بهینه برنامه‌ریزی سرویس‌های پیشگیرانه‌ای است که در آن کمترین تعمیرات اصلاحی و توقفات ناشی از خرابی با بیشترین قابلیت اطمینان را مدنظر قرار داده است. با توجه به عدم محدودیت هزینه می‌توان جوابی که بیشترین قابلیت اطمینان را دارد به عنوان بهترین جواب در نظر گرفت.

نتایج حاصل از اجرای روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته نسخه ۲ که ابتدا باید جدول موازنه را تشکیل دهیم.

جدول ۳: جدول موازنه حالت بهینه

	Objective 1	Objective 2
Min objective 1	508.82	0.5004
Max objective 2	589.62	0.6253

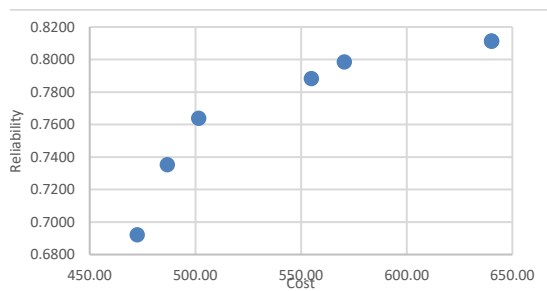
برای درک بهتر روابط بین نرخ خرابی با هزینه و قابلیت اطمینان، نرخ خرابی را در این مرحله ۰/۲ کم می‌کنیم که جدول موازنه آن بصورت زیر می‌باشد:

جدول ۵: جدول موازنه حالت کاهش نرخ خرابی

	Objective 1	Objective 2
Min objective 1	472.50	0.6920
Max objective 2	640.18	0.8113

نتایج بدست آمده در جدول شماره ۱۰ نشان داده شده است با مقایسه نتایج افزایش و کاهش نرخ خرابی بهتر می‌توان اهمیت آن در افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه را درک کرد.

نمودار جواب‌های پارتویی به صورت زیر است (محور افقی هزینه و محور عمودی قابلیت اطمینان سیستم را نشان می‌دهد).



شکل ۴: نمودار جواب‌های پارتویی

کم کردن فاصله بین دو سرویس متوالی تاثیر مستقیم بر هزینه کل سرویس پیشگیرانه دارد و آن را افزایش می‌دهد. به طور مثال، اگر فاصله بین دو سرویس متوالی به ۱۰ ماه (۰/۸۳ سال) تغییر کند، هزینه سرویس پیشگیرانه نسبت به سرویس سالیانه افزایش پیدا می‌کند. نتایج این تغییر در جدول ۶ نشان داده شده است. در این جدول ضمن کاهش فاصله سرویس‌های نگهداری، به همان نسبت هزینه انجام هر نوع سرویس نیز افزایش داده شده است.

پیشگیرانه قابلیت اطمینان افزایش یافته است و هزینه‌های توقف تولید و نگهداری اصلاحی نیز کاهش یافته است. جواب کارای شماره ۷ بهترین جواب از نظر قابلیت اطمینان می‌باشد که برای اجزای ۱، ۲ و ۳ نوع سرویس پیشگیرانه ۱ در نظر گرفته شده است که بیش‌ترین حالت سرویس پیشگیرانه را دارد.

۷- تحلیل حساسیت

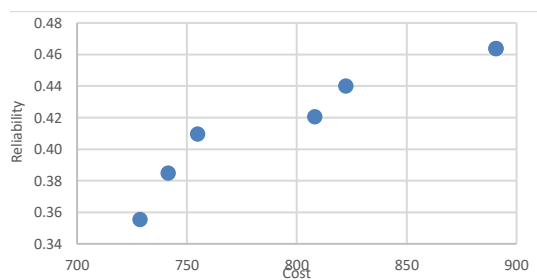
در این بخش تحلیل حساسیت نتایج مثال قبل با توجه به تغییر تعداد سرویس‌های نگهداری پیشگیرانه و نرخ خرابی مجموعه‌ها که در اینجا مهمترین پارامترهای مدل هستند، انجام می‌گیرد.

ابتدا تغییر نرخ خرابی مجموعه‌ها مد نظر قرار می‌گیرد. اگر نرخ خرابی هر مجموعه را ۰/۲ افزایش دهیم. جدول موازنه بصورت زیر می‌باشد:

جدول ۴: جدول موازنه حالت افزایش نرخ خرابی

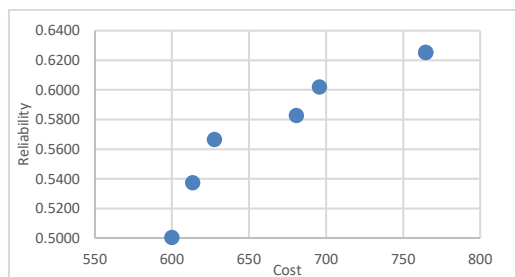
	Objective 1	Objective 2
Min objective 1	728.58	0.3555
Max objective 2	890.50	0.4638

جواب‌های کارای مسئله بصورت جدول شماره ۹ بدست می‌آید که هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه افزایش و قابلیت اطمینان کل کاهش می‌یابد و بیانگر این است که کیفیت قطعات یا به عبارتی قابلیت اطمینان ذاتی قطعات در افزایش قابلیت اطمینان کل و کاهش هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه بسیار موثر است. نمودار جواب‌های پارتویی به صورت زیر است (محور افقی هزینه و محور عمودی قابلیت اطمینان سیستم را نشان می‌دهد).



شکل ۳: نمودار جواب‌های پارتویی

نمودار جواب‌های پارتویی به صورت زیر است (محور افقی هزینه و محور عمودی قابلیت اطمینان سیستم را نشان می‌دهد).



شکل ۵: نمودار جواب‌های پارتویی

بنابراین در مدل ارائه شده برای بهینه‌سازی برنامه تعمیرات پیشگیرانه قابلیت اطمینان-محور بعد از تعیین بهترین برنامه پیشگیرانه، نرخ خرابی مجموعه‌ها بیشترین تاثیر را روی هزینه دارد. لازم به ذکر است که به طور کلی نرخ خرابی به سه عامل سرویس پیشگیرانه، بازرسی فنی و کیفیت قطعات بستگی دارد.

۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در مدل ارائه شده مسئله برنامه‌ریزی سرویس‌های نگهداری قابلیت اطمینان-محور مورد بحث قرار گرفته است. در این پژوهش به منظور ساده‌سازی مسئله مفروضاتی مانند محدودیت نوع خرابی هر مجموعه، ناچیز بودن زمان انجام سرویس پیشگیرانه و ثابت بودن نرخ خرابی در نظر گرفته شده‌اند که به منظور ایجاد امکان استفاده از توزیع پواسون برای خرابی مجموعه‌ها بوده است. بجز مفروض اول، سایر این مفروضات تا حد زیادی برای سیستم‌هایی که در دوران بلوغ سیکل عمر خود قرار دارند با واقعیت انطباق دارد. در صورت وجود چند نوع خرابی برای هر مجموعه باید از توزیع‌های احتمالی ترکیبی مانند توزیع پواسون مرکب استفاده شود.

مشخص بودن زمان تعمیر که در مفروض دوم در نظر گرفته شده می‌تواند مورد بحث قرار گیرد، زیرا معمولاً زمان تعمیرات احتمالی بوده و با توجه به نوع خرابی و امکانات تعمیراتی متفاوت خواهد بود که توسعه مدل با توجه به احتمالی بودن این پارامتر به پژوهش‌های آینده واگذار می‌گردد. همچنین در پژوهش‌های آینده ممکن است زمان تعمیرات اصلاحی تابعی از سرویس‌ها یا محدودیت‌هایی از نظر حداقل قابلیت اطمینان و حجم سرویس‌های پیشگیرانه در نظر گرفته شوند.

جدول ۶: اطلاعات مربوط به تغییر فاصله بین سرویس‌های نگهداری در تحلیل حساسیت

مجموعه (i)	نوع نگهداری پیشگیرانه (j)	فاصله بین دو سرویس متوالی بر حسب سال (θ_{ij})	نرخ خرابی زیرمجموعه بر حسب دفعه بر سال (λ_{ij})	هزینه کل سرویس پیشگیرانه در سال (C_{ij}^p)
۱ و ۲	۱ (۲ ماهه)	$\frac{1}{6}$	۰/۳	۱۵۰
۱ و ۲	۲ (۵ ماهه)	$\frac{5}{12}$	۰/۳	۷۲
۱ و ۲	۳ (۱۰ ماهه)	$\frac{5}{6}$	۰/۷	۴۸
۳	۱ (۲ ماهه)	$\frac{1}{6}$	۰/۴	۲۲۵
۳	۲ (۳ ماهه)	$\frac{1}{4}$	۰/۷	۱۶۰
۳	۳ (۵ ماهه)	$\frac{5}{12}$	۰/۹	۱۰۸
۳	۴ (۱۰ ماهه)	$\frac{5}{6}$	۱/۱	۶۰

با حل دوباره مسئله، هزینه‌های کل سیستم مجدداً محاسبه شده‌اند که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

اگر فاصله سرویس‌های نگهداری کاهش و به همان نسبت هزینه انجام هر نوع سرویس نیز افزایش داده شود جدول موازنه بصورت زیر می‌باشد:

جدول ۷: جدول موازنه حالت کاهش فاصله سرویس

	Objective 1	Objective 2
Min objective 1	599.82	0.5004
Max objective 2	764.62	0.6253

در جدول شماره ۱۱ مشاهده می‌کنید که با کم کردن فاصله بین دو سرویس متوالی یا به عبارتی افزایش تعداد نگهداری پیشگیرانه در سال هزینه کل به شدت افزایش یافته است، در صورتی که قابلیت اطمینان سیستم نسبت به حالت اول (بهینه) افزایش نیافته و ثابت مانده است، بنابراین می‌توان از این تحلیل چنین نتیجه گرفت که با نگهداری پیشگیرانه تا حد معینی می‌توان قابلیت اطمینان سیستم را افزایش داد و پارامتر مهمی که بعد از بهینه‌سازی نگهداری پیشگیرانه نقش موثری در افزایش قابلیت اطمینان دارد همان نرخ خرابی (قابلیت اطمینان ذاتی) قطعات است.

در این مقاله یک مدل ریاضی صفر و یک غیرخطی برای انتخاب بهترین نوع سرویس پیشگیرانه بر محور بهینه‌سازی هزینه کل سیستم شامل هزینه‌های سرویس پیشگیرانه، تعمیرات اصلاحی و توقفات ناشی از خرابی و همچنین قابلیت‌اطمینان ارائه شده است. کاربرد مدل ارائه شده برای یک سیستم موردی صنعتی نشان داده شده است و نتایج حاصل از حل آن مورد بحث قرار گرفت. حساسیت نتایج مثال حل شده نسبت به تغییر پارامترهای اصلی مسئله شامل نرخ خرابی و فاصله زمانی و هزینه انجام

در این مقاله یک مدل ریاضی صفر و یک غیرخطی برای انتخاب بهترین نوع سرویس پیشگیرانه بر محور بهینه‌سازی هزینه کل سیستم شامل هزینه‌های سرویس پیشگیرانه، تعمیرات اصلاحی و توقفات ناشی از خرابی و همچنین قابلیت‌اطمینان ارائه شده است. کاربرد مدل ارائه شده برای یک سیستم موردی صنعتی نشان داده شده است و نتایج حاصل از حل آن مورد بحث قرار گرفت. حساسیت نتایج مثال حل شده نسبت به تغییر پارامترهای اصلی مسئله شامل نرخ خرابی و فاصله زمانی و هزینه انجام

جدول ۸: جواب‌های پارتویی کارا توسط نرم افزار گمز

No. of Pareto solution	Objective 1 value	Objective 2 value	PM_cost	Stop_cost	Maintenance_cost	Component 1	Component 2	Component 3
۱	۵۰۸۸۲	۰.۵۰۰۴	۲۳۰.۰۰	۲۰۸۸۲	۷۰.۰۰	۳	۳	۱
۲	۵۱۸.۳۰	۰.۵۳۷۵	۲۵۰.۰۰	۲۰۶.۳۰	۶۲.۰۰	۲	۳	۱
۳	۵۲۸.۵۰	۰.۵۶۶۵	۲۷۰.۰۰	۲۰۴.۵۰	۵۴.۰۰	۲	۲	۱
۴	۵۴۷.۷۸	۰.۵۸۲۹	۲۹۰.۰۰	۲۰۳.۷۸	۵۴.۰۰	۳	۱	۱
۵	۵۵۸.۷۰	۰.۶۰۲۰	۳۱۰.۰۰	۲۰۲.۷۰	۴۶.۰۰	۲	۱	۱
۶	۵۸۹.۶۲	۰.۶۲۵۳	۳۵۰.۰۰	۲۰۱.۶۲	۳۸.۰۰	۱	۱	۱
۷	۵۸۹.۶۲	۰.۶۲۵۳	۳۵۰.۰۰	۲۰۱.۶۲	۳۸.۰۰	۱	۱	۱

جدول ۹: جواب‌های پارتویی کارا توسط نرم افزار گمز (افزایش نرخ خرابی)

No. of Pareto solution	Objective 1 value	Objective 2 value	PM_cost	Stop_cost	Maintenance_cost	Component 1	Component 2	Component 3
۱	۷۲۹	۰.۳۶	۳۲۱.۰۰	۳۱۴.۵۸	۹۳.۰۰	۳	۳	۱
۲	۷۴۱	۰.۳۸	۳۴۵.۰۰	۳۱۱.۳۴	۸۵.۰۰	۲	۳	۱
۳	۷۵۵	۰.۴۱	۳۶۹.۰۰	۳۰۸.۸۲	۷۷.۰۰	۲	۲	۱
۴	۸۰۸	۰.۴۲	۴۲۳.۰۰	۳۰۸.۱۰	۷۷.۰۰	۱	۳	۱
۵	۸۲۲	۰.۴۴	۴۴۷.۰۰	۳۰۶.۳۰	۶۹.۰۰	۲	۱	۱
۶	۸۹۱	۰.۴۶	۵۲۵.۰۰	۳۰۴.۵۰	۶۱.۰۰	۱	۱	۱
۷	۸۹۱	۰.۴۶	۵۲۵.۰۰	۳۰۴.۵۰	۶۱.۰۰	۱	۱	۱

جدول ۱۰: جواب‌های پارتویی کارا توسط نرم افزار گمز (کاهش نرخ خرابی)

No. of Pareto solution	Objective 1 value	Objective 2 value	PM_cost	Stop_cost	Maintenance_cost	Component 1	Component 2	Component 3
۱	۴۷۲.۵۰	۰.۶۹۲۰	۳۲۱.۰۰	۱۰۴.۵۰	۴۷.۰۰	۳	۳	۱
۲	۴۸۶.۸۰	۰.۷۳۵۲	۳۴۵.۰۰	۱۰۲.۷۰	۳۹.۰۰	۲	۳	۱
۳	۵۰۱.۶۲	۰.۷۶۳۷	۳۶۹.۰۰	۱۰۱.۶۲	۳۱.۰۰	۲	۲	۱
۴	۵۵۴.۹۰	۰.۷۸۸۱	۴۲۳.۰۰	۱۰۰.۹۰	۳۱.۰۰	۳	۱	۱
۵	۵۷۰.۵۴	۰.۷۹۸۵	۴۴۷.۰۰	۱۰۰.۵۴	۲۳.۰۰	۲	۱	۱
۶	۶۴۰.۱۸	۰.۸۱۱۳	۵۲۵.۰۰	۱۰۰.۱۸	۱۵.۰۰	۱	۱	۱
۷	۶۴۰.۱۸	۰.۸۱۱۳	۵۲۵.۰۰	۱۰۰.۱۸	۱۵.۰۰	۱	۱	۱

جدول ۱۱: جواب‌های پارتویی کارا توسط نرم افزار گمز (کاهش فاصله بین نگهداری)

No. of Pareto solution	Objective 1 value	Objective 2 value	PM_cost	Stop_cost	Maintenance_cost	Component 1	Component 2	Component 3
۱	۶۰۰	۰.۵۰۰۴	۳۲۱.۰۰	۲۰۸.۸۲	۷۰.۰۰	۳	۳	۱
۲	۶۱۳	۰.۵۳۷۵	۳۴۵.۰۰	۲۰۶.۳۰	۶۲.۰۰	۲	۳	۱
۳	۶۲۸	۰.۵۶۶۵	۳۶۹.۰۰	۲۰۴.۵۰	۵۴.۰۰	۲	۲	۱
۴	۶۸۱	۰.۵۸۲۹	۴۲۳.۰۰	۲۰۳.۷۸	۵۴.۰۰	۳	۱	۱
۵	۶۹۶	۰.۶۰۲۰	۴۴۷.۰۰	۲۰۲.۷۰	۴۶.۰۰	۲	۱	۱
۶	۷۶۵	۰.۶۲۵۳	۵۲۵.۰۰	۲۰۱.۶۲	۳۸.۰۰	۱	۱	۱
۷	۷۶۵	۰.۶۲۵۳	۵۲۵.۰۰	۲۰۱.۶۲	۳۸.۰۰	۱	۱	۱

[8] Levitin, G., Lisnianski, A., Ben-Haim, H. & Elmakis, D. (1998). Redundancy optimization for series-parallel multi-state systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 47: 165–172.

[9] Tian, Z., Zuo, M. J. & Huang, H. (2008). Reliability-redundancy allocation for multi-state seriesparallel systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 57: 303–310.

[10] Castro, H.F., Cavalca, K.L. (2005). Maintenance Resources Optimization Applied to a Manufacturing System, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, pp. 413–20.

[11] Gabbar, H.A., Yamashita, H., Suzuki, K. & Shimada, Y. (2003). Computer-aided RCM-based plant maintenance management system. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 19:449-58.

[12] Wessels, R.W. (2003). Cost optimized scheduled maintenance interval for reliability centered maintenance. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium IEEE*, 412-6.

[13] Sahoo, T., Sarkar, P. K., Sarkar, A. K., & Iocl, C. M. (2014). Maintenance optimization for critical equipments in process industries based on FMECA method. *Int J Eng Innov Technol*, 3(10), 107-112.

[14] Wang, S., & Liu, M. (2015). Multi-objective optimization of parallel machine scheduling integrated with multi-resources preventive

۹- مراجع

[1] Swanson, L. (2001). Linking maintenance strategies to performance. *International journal of production economics*, 70(3), 237-244.

[2] Vassiliadis, C. G., & Pistikopoulos, E. N. (2001). Maintenance scheduling and process optimization under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 25(2-3), 217-236.

[3] Sahoo, T., Sarkar, P. K., Sarkar, A. K., & Iocl, C. M. (2014). Maintenance optimization for critical equipments in process industries based on FMECA method. *Int J Eng Innov Technol*, 3(10), 107-112.

[4] Kennedy, R. (2005). Examining the Processes of RCM and TPM. *The Plant Maintenance Resource Center, The Centre for TPM (Australasia)*.

[5] Nourelfath, M., & Ait-Kadi, D. (2007). Optimization of series-parallel multi-state systems under maintenance policies. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(12), 1620-1626.

[6] Marseguerra, M., Zio, E. & Podofillini, L. (2005). Multi objective spare part allocation by means of genetic algorithms and monte-carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 87: 325–335.

[7] Finkelstein, M. (2009). On systems with shared resources and optimal switching strategies. *Reliability Engineering & System Safety*, 94, 1358–1362.

- systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 204, 107143.
- [24] Hamdan, K., Tavangar, M., & Asadi, M. (2021). Optimal preventive maintenance for repairable weighted k-out-of-n systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 205, 107267.
- [25] Bisht, S., & Singh, S. B. (2021). Reliability Evaluation of Repairable Parallel-Series Multi-State System Implementing Interval Valued Universal Generating Function. *Journal of Reliability and Statistical Studies*, 81-120.
- [26] Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.
- maintenance planning. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 182-192.
- [15] A Rahmati, S. H., Ahmadi, A., & Karimi, B. (2018). Developing simulation based optimization mechanism for a novel stochastic reliability centered maintenance problem. *Scientia Iranica*, 25(5), 2788-2806.
- [16] Moslemi, N., Kazemi, M., Abedi, S. M., Khatibzadeh-Azad, H., & Jafarian, M. (2017). Mode-based reliability centered maintenance in transmission system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27(4), e2289.
- [17] Pourahmadi, F., Fotuhi-Firuzabad, M., & Dehghanian, P. (2016). Application of game theory in reliability-centered maintenance of electric power systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(2), 936-946.
- [18] Cullum, J., Binns, J., Lonsdale, M., Abbassi, R., & Garaniya, V. (2018). Risk-Based Maintenance Scheduling with application to naval vessels and ships. *Ocean Engineering*, 148, 476-485.
- [19] Amiri, S., & Honarvar, M. (2018). Providing an integrated Model for Planning and Scheduling Energy Hubs and preventive maintenance. *Energy*, 163, 1093-1114.
- [20] Shayesteh, E., Yu, J., & Hilber, P. (2018). Maintenance optimization of power systems with renewable energy sources integrated. *Energy*, 149, 577-586.
- [21] Tsai, Y. T., Wang, K. S., & Tsai, L. C. (2004). A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 84(3), 261-270.
- [22] Li, L., Wang, Y., & Lin, K. Y. (2021). Preventive maintenance scheduling optimization based on opportunistic production-maintenance synchronization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(2), 545-558.
- [23] Eryilmaz, S. (2020). Age-based preventive maintenance for coherent systems with applications to consecutive-k-out-of-n and related

