

برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات با استفاده از شبیه‌سازی و تحلیل پوششی داده‌ها

محمد شیخ علیشاهی^۱، علی آزاده^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲. استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۹۲/۸/۱۲ - تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۳/۸/۱۰ - تاریخ تصویب ۹۴/۳/۱۸)

چکیده

برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات، به‌خصوص برای سازمان‌ها و صنایع بزرگ اهمیت زیادی دارد. چنانچه ملاحظات ایمنی و اقتصادی را به طور هم‌زمان در نظر بگیریم، اهمیت مسئله را از دیدگاه مدل‌سازان و مدیران بیشتر می‌سازد. در این پژوهش فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات سیستم تولیدی بررسی شده است. در ابتدا، با استفاده از شبیه‌سازی AweSim فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات این سیستم شبیه‌سازی شده است. توابع تولیدی و نگهداری و تعمیرات با توجه به سوابق تخمین‌زده شده و شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف بازه‌های نگهداری و تعمیرات اجرا می‌شود. با تغییر پارامترهای ورودی، خروجی‌های مسئله به دست می‌آید. با توجه به اینکه معیارهای مختلفی جهت بررسی خروجی‌ها در نظر گرفته شده است، از تحلیل پوششی داده‌ها برای انتخاب بهترین گزینه استفاده شده است. در پایان بهترین گزینه‌ها با در نظر گرفتن هزینه، قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی، طول صف و میزان به‌کارگیری ماشین‌آلات ارائه شده است. تصمیم‌گیران می‌توانند با در نظر گرفتن اولویت‌های مختلف هر یک از این گزینه‌ها را برای اجرا برگزینند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی فعالیت‌ها، شبیه‌سازی، نگهداری و تعمیرات، همبستگی.

مقدمه

[۱۲] برای محاسبه هزینه‌های عملیاتی طی دوره برنامه‌ریزی و ارزیابی قابلیت دسترسی روشی احتمالی ارائه داده و ارتباط آن را با فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده در نظر گرفته است. این روش هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه‌های تعمیر خرابی و هزینه نگهداری و تعمیرات را کاهش می‌دهد، در حالی که سطح بالاتری از قابلیت دسترسی ارائه می‌گردد. هیگینز [۱۳] مدلی برای تخصیص بهینه منابع و کادر نگهداری و تعمیرات ارائه داده است تا کمترین اختلال در برنامه حرکت قطارها ایجاد شود و زمان اتمام کارها نیز کاهش یابد. در مدل محدودیت‌هایی نظیر محدودیت بودجه، تقدم و تأخر فعالیت‌ها، حداقل دسترسی و کمترین رفت‌وآمد در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه پیچیدگی‌های مسئله با افزایش توابع هدف و محدودیت‌ها افزایش می‌یابد، در متون از روش‌های فراابتکاری برای یافتن جواب استفاده شده است [۱۴-۱۶]. هداوی [۱۶] از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی برنامه

بسیاری از حوادث خطیر در دنیایی اتفاق می‌افتد که در آن سیستم‌ها در مقیاس بزرگ و پیچیده است و سبب ایجاد خسارات سنگین و احساس عدم ثبات در جامعه می‌شود. در چهار دهه اخیر، دستاوردهای باارزشی در خط‌مشی نگهداری و تعمیرات در نظریه قابلیت اطمینان به دست آمده است [۱]. نگهداری و تعمیرات عبارت است از ترکیبی از فعالیت‌های فنی، مدیریتی و اجرایی در طول عمر وسیله، برای حفظ یا برگشتن به وضعیت مطلوب. در مطالعات پیشین برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات از جنبه‌های گوناگون بحث و بررسی شده است [۲-۶]. روش‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات وجود دارد، از جمله برنامه‌ریزی ریاضی، روش‌های فراابتکاری و شبیه‌سازی. همچنین، به‌منظور حصول جواب‌های دقیق‌تر، ترکیبی از این روش‌ها استفاده می‌شود. یکی از روش‌هایی که دقت بسیار زیادی دارد روش برنامه‌ریزی و مدل‌سازی ریاضی است [۷-۱۱]. میثالویچ

تحلیل پوششی داده‌ها برای برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات ارائه می‌شود.

تعریف مسئله

هدف از این تحقیق مدل‌سازی و برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات یک واحد عملیاتی است. برای این کار می‌توان از روش‌های دقیق تحلیلی و مدل‌های ریاضی یا شبیه‌سازی استفاده کرد. با توجه به ماهیت پیچیده و پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر آن، مدل دقیق ریاضی برای این مسئله وجود ندارد. بنابراین، شبیه‌سازی برای مدل‌کردن فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات استفاده می‌شود. شبیه‌سازی روش بسیار ارزش‌مندی است و به‌طور گسترده‌ای در حل مسائل مختلف مهندسی استفاده می‌شود. در این روش شاخص‌ها و پارامترهای نگهداری و تعمیرات از شبیه‌سازی فرایند واقعی و با توجه به رفتار اتفاقی سیستم برآورد می‌شود. با توجه به اینکه در این مسئله اهداف مختلفی نظیر هزینه، قابلیت دسترسی و کاهش موجودی بین بخش‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود، با مسئله‌ای چندمعیاره روبه‌رویم.

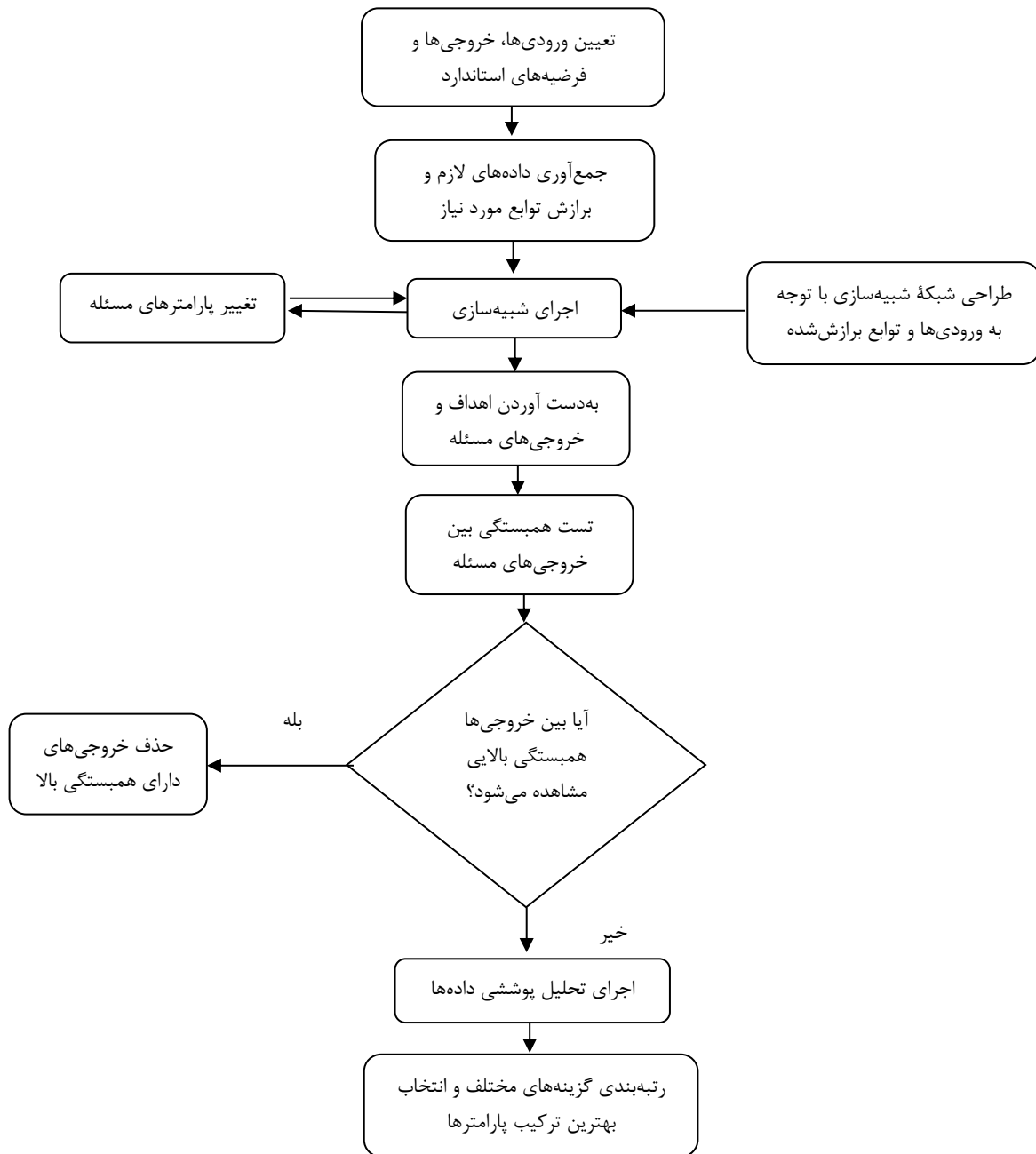
روش‌های مختلفی برای یافتن بهترین جواب برای مسائل چندمعیاره در متون وجود دارد. در این مقاله از روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) برای یافتن بهترین جواب استفاده شده که ترکیبی از پارامترهای مختلف است. از دلایل استفاده از این روش می‌توان به امکان ارزیابی عملکرد کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده با چندین ورودی و چندین خروجی و عدم نیاز به شکل تابع توزیع از قبل تعیین شده (مانند روش‌های رگرسیون آماری) یا شکل صریح تابع تولید (مانند برخی روش‌های پارامتری) اشاره کرد [۲۶].

الگوریتم پیشنهادی حل مسئله

مدلسازی و حل مسئله برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات سیستمی پیچیده و غیرخطی است که از اجزای مختلفی تشکیل شده است. بنابراین، روشی باید ارائه شود که بتوان این پیچیدگی‌ها را مدل‌سازی کرد. بنابراین، الگوریتم ادغامی با ترکیبی شبیه‌سازی و تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شده است (شکل ۱).

نگهداری و تعمیرات تأسیسات انرژی هسته‌ای در طول توقف‌های برنامه‌ریزی شده استفاده شده است. الگوریتم ارائه شده با مدل هزینه-ریسک ادغام پذیر است و بهترین هزینه را با توجه به ریسک مورد انتظار به دست می‌دهد. این هزینه و ریسک را تصمیم‌گیر می‌تواند تغییر دهد. با افزایش سایز مسئله و افزایش محدودیت‌ها و توابع هدف، پیچیدگی‌های مسئله افزایش می‌یابد. با توجه به دشواری، و در بعضی موارد ناممکن بودن دستیابی به روش تحلیلی، از شبیه‌سازی برای حل مسئله بهینه‌سازی نگهداری استفاده شده است [۱۷-۲۰]. در مجموع، از مدل شبیه‌سازی برای تعیین افراد مورد نیاز برای بخش نگهداری و تعمیرات استفاده شده است. داده‌های ورودی شامل دستور کارهای مختلف است. تأثیر سیاست‌های سازمانی کادر نگهداری و تعمیرات بر بهینه‌سازی پرسنل نگهداری و تعمیرات بررسی می‌شود. بر اساس نتایج، بهترین جواب زمانی حاصل می‌شود که کادر نگهداری و تعمیرات بتواند فرای مرز و محدوده کاری خود فعالیت کند. لنگر و همکاران [۲۲] سیاست توزیع بر پایه اولویت را در نظر گرفته‌اند. در این سیاست اولویت پس از زمان ثابت به ماشینی که گلوگاه است تخصیص داده می‌شود، و کادر نگهداری و تعمیرات بر اساس بالاترین اولویت به ماشین‌ها سرویس می‌دهد. با شبیه‌سازی نشان داده شده است که این سیاست در مقایسه با سیاست «ماشینی که زودتر خراب می‌شود زودتر سرویس شود»، نتایج بهتری به همراه دارد. وایت [۲۳] از شبیه‌سازی کامپیوتری برای مدل‌سازی و ابزار تصمیم‌گیری برای مدیریت گروه پایش وضعیت استفاده کرده است.

روش‌های ترکیبی با هدف استفاده از مزایای روش‌های مختلف و پوشاندن ضعف‌های آن‌ها استفاده می‌شود. یو و گارسیا-دیز [۲۴] ترکیبی از روش‌های شاخه و کران و برنامه‌ریزی پویا را برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات کفیوش خیابان بزرگراه‌ها ارائه داده‌اند. گوئل و میسل [۲۵] مسئله زمان‌بندی و تخصیص نیروی کار نگهداری و تعمیرات برای تعمیر شبکه برق را در نظر گرفته‌اند. هدف تخصیص کارها به نیروها و زمان‌بندی کارها به گونه‌ای است که زمان توقف‌ها و زمان سفر کاهش یابد. در این مطالعه الگوریتم ترکیبی بر اساس شبیه‌سازی و



شکل ۱. الگوریتم ادغامی برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات

می‌شود. پس از برآزش توابع ورودی شبکه شبیه‌سازی ترسیم می‌شود. شبیه‌سازی به دفعات و برای ورودی‌های مختلف نظیر زمان‌های نگهداری و تعمیرات دوره‌ای و تعداد افراد لازم برای کادر نگهداری و تعمیرات اجرا می‌شود. نتایج و خروجی‌های مختلف بر اساس شبیه‌سازی جمع‌آوری می‌شود. سپس، با استفاده از تست همبستگی

در این الگوریتم ابتدا ورودی‌ها و خروجی‌های استاندارد با توجه به مطالعات قبلی مشخص می‌شود. سپس، داده‌های لازم جمع‌آوری می‌شود. در این مرحله داشتن سوابق تولیدی و تعمیراتی معتبر بسیار مهم است، زیرا توابع خرابی و تولیدی از آن‌ها استخراج می‌شود. هرچه این داده‌ها دقیق‌تر باشد، توابع مورد نیاز با دقت بیشتری برآزش

در زمینه روش تحلیل پوششی داده‌ها به مراجع [۲۶] و [۲۸] مراجعه کنید.

۳. مطالعه موردی

در این مطالعه یک سیستم با سه ماشین که به طور سری کار می‌کنند در نظر گرفته شده است. این ماشین‌ها به صورت دوره‌ای و با فواصل زمانی معین به نگهداری و تعمیرات دوره‌ای نیاز دارد. هر یک از این ماشین‌ها بر اساس توابع توزیع خاصی در معرض خرابی قرار دارد. با افزایش فواصل زمانی نگهداری و تعمیرات دوره‌ای احتمال خرابی افزایش می‌یابد و این موضوع باعث افزایش هزینه سیستم می‌شود، زیرا علاوه بر اینکه سیستم زمان بیشتری متوقف است، هزینه‌های پیش‌بینی نشده به سیستم وارد و برنامه تولیدی نیز دچار وقفه می‌شود. همچنین، هنگامی که ماشین خراب می‌شود، فرایند مورد نظر متوقف می‌شود و اگر قطعه‌ای در حال خدمت‌گرفتن باشد، غیرقابل استفاده می‌شود و این موضوع هزینه را افزایش می‌دهد.

از طرف دیگر، با کاهش فواصل بین نگهداری و تعمیرات، زمان‌های توقف افزایش می‌یابد، و این موضوع نیز خود از جنبه‌های مختلف هزینه‌های سیستم را افزایش می‌دهد. با کاهش فواصل نگهداری و تعمیرات، دفعات لازم برای بازدید و تعمیرات دوره‌ای افزایش می‌یابد. در این صورت افراد بیشتری برای انجام عملیات نگهداری و تعمیرات نیاز است. علاوه بر این، توقف‌های سیستم باعث کاهش زمان‌های در دسترس می‌شود و مقدار تولید کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش تعداد توقف‌ها، برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات دشوارتر می‌شود، زیرا کادر نگهداری و تعمیرات زمان کمتری برای انجام عملیات خود دارد. بنابراین، مسئله یافتن بهترین فواصل زمانی برای نگهداری و تعمیرات دوره‌ای و تعداد افراد مورد نیاز برای این کار است. با توجه به اینکه برای اجرای شبیه‌سازی به داده‌های ورودی به صورت توابع یا اعداد ثابت نیاز داریم، ابتدا لازم است توابع خرابی و توابع تولیدی شناخته شود. با استفاده از نرم‌افزار SPSS توابع مختلف مورد به داده‌ها برازش شده است. توابع دارای بیشترین انطباق با داده‌های مطالعه موردی در جدول ۱ و داده‌های مربوط به مطالعه موردی در جدول پیوست ۱ آمده است.

خروجی‌هایی که همبستگی بالایی دارد تشخیص داده و حذف می‌شود. در این مرحله ورودی‌ها و خروجی‌های لازم برای اجرای روش تحلیل پوششی داده‌ها آماده است. بر اساس ماهیت مسئله و داده‌ها، روش تحلیل پوششی داده‌های مناسب مشخص و اجرا می‌شود و رتبه‌بندی برای گزینه‌های مختلف دنبال می‌شود.

۱. شبیه‌سازی

حل و مدل‌سازی مسئله نگهداری و تعمیرات به دو روش تحلیلی و شبیه‌سازی میسر است. شبیه‌سازی روش بسیار ارزش‌مندی است و به طور گسترده‌ای در حل مسائل واقعی مهندسی استفاده می‌شود. در این روش شاخص‌های قابلیت اطمینان از مشابه‌سازی فرایند واقعی و با توجه به رفتار اتفاقی سیستم برآورد می‌شود. بنابراین، با مسئله به صورت تعدادی آزمایش‌های شبیه تجربیات واقعی در طول زمان برخورد می‌شود و در برآورد احتمالات و سایر شاخص‌ها از روش شمارش تعداد دفعات وقوع رخدادها استفاده می‌شود [۲۷].

۲. تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)

به‌طور کلی، روش‌های مختلف ارزیابی کارایی به دو دسته روش‌های پارامتری و روش‌های ناپارامتری تقسیم می‌شود. روش تحلیل پوششی داده‌ها یا DEA یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های ناپارامتری ارزیابی کارایی است. این روش که عمدتاً روش اندازه‌گیری کارایی در جهان شناخته شده است در حین اندازه‌گیری، کارایی نوع بازده نسبت به مقیاس را نیز ارائه می‌دهد. با پیشرفت و تکامل روش فوق، در حال حاضر DEA یکی از حوزه‌های فعال تحقیقاتی در اندازه‌گیری کارایی است و به‌طور چشمگیری مورد استقبال پژوهشگران جهان قرار گرفته است. روش DEA مبتنی بر یک سری بهینه‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی است که به آن روش ناپارامتری نیز گفته می‌شود. در این روش منحنی مرزهای کارا از یک سری نقاط تعیین شده با برنامه‌ریزی خطی ایجاد می‌شود. روش برنامه‌ریزی خطی بعد از اجرای بهینه‌سازی مشخص می‌کند که آیا واحد تصمیم‌گیری مورد نظر روی مرز کارایی قرار گرفته است یا خارج از آن قرار دارد. بدین وسیله واحدهای کارا و ناکارا از یکدیگر تفکیک می‌شود. برای اطلاعات بیشتر

از سیستم خارج می‌شود. نگهداری و تعمیرات دوره‌ای را سه شبکه مجزا نمایش می‌دهد که هر یک برای یکی از ماشین‌ها طراحی شده است (شکل ۳). در این شبکه یک نهاد را گره CREAT تولید می‌کند و پس از زمان معین، که همان فاصله زمانی تعیین شده برای نگهداری و تعمیرات دوره است، ابتدا وارد گره ASSIGN می‌شود که تعداد دفعات نگهداری و تعمیرات دوره‌ای را جمع‌آوری می‌کند. سپس، وارد گره ALTER می‌شود و ظرفیت ماشین را به خود اختصاص می‌دهد. وارد گره AWAIT می‌شود و منتظر اپراتور نگهداری و تعمیرات می‌ماند. پس از آن با توزیع مشخصی نگهداری و تعمیرات دوره‌ای انجام می‌شود و ظرفیت ماشین، همچنین اپراتور نگهداری و تعمیرات را گره‌های FREE و ALTER تغییر می‌دهد. پس از طی فاصله زمانی تا نگهداری و تعمیرات دوره‌ای بعدی، دوباره وارد گره ASSIGN می‌شود و به تعداد دفعات نگهداری و تعمیرات دوره‌ای افزوده می‌شود. این شبکه به صورت متوالی تا پایان شبیه‌سازی برای هر یک از ماشین‌ها تکرار می‌شود.

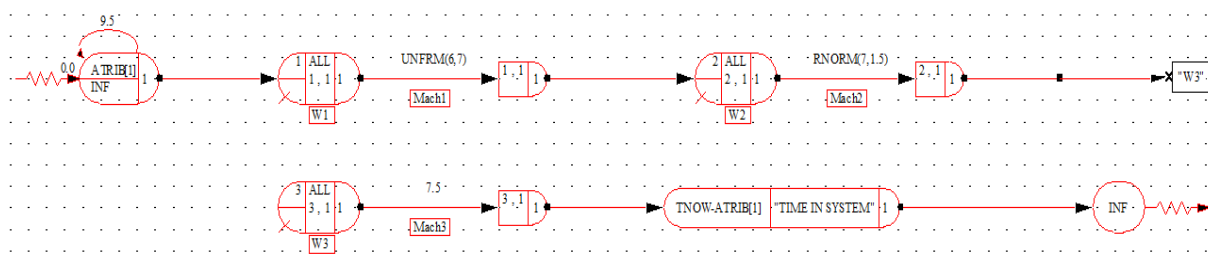
در بخش پایانی شبکه‌های خرابی پیش‌بینی نشده قرار دارد و برای هر ماشین شبکه جداگانه‌ای برای نمایش این خرابی‌ها ترسیم شده است (شکل ۴). این شبکه با گره CREAT آغاز می‌شود که نهادی را وارد شبکه می‌کند. این نهاد وارد گره GOON می‌شود و یک شرط را بررسی می‌کند. اگر زمان اتمام آخرین نگهداری و تعمیرات دوره‌ای بیشتر از زمان مورد انتظار برای خرابی سیستم باشد، نهاد وارد شبکه می‌شود و خرابی اتفاق می‌افتد.

جدول ۱. توابع برازش شده با استفاده از SPSS

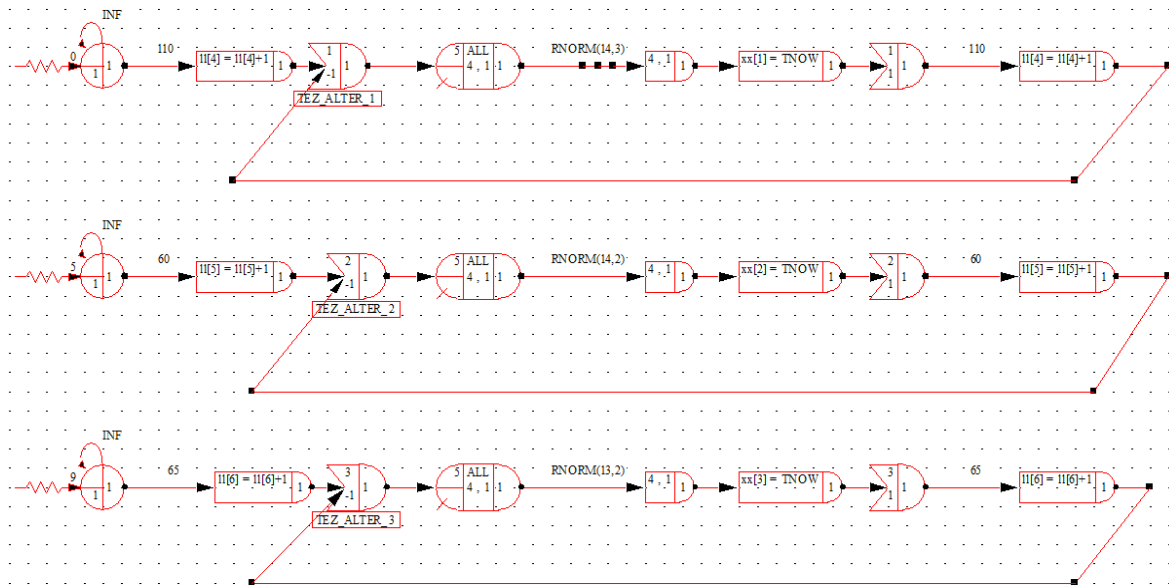
پارامتر	ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳
زمان سرویس خرابی	N (16,3)	N (15,4)	N (15,3)
فاصله بین دو خروجی متوالی	Uniform (6 7)	N(7, 1.5)	7.5
فاصله بین دو خرابی متوالی	Exp (80)	Exp (75)	Exp(66)
زمان سرویس نگهداری و تعمیرات دوره‌ای	N(14,3)	N(14,2)	N(13,2)

۴. اجرای شبیه سازی

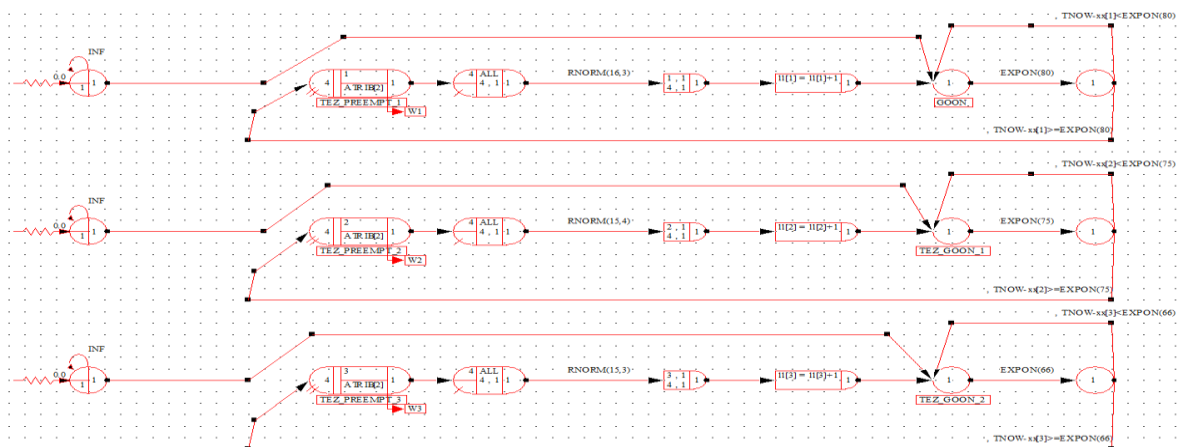
پس از تعیین ورودی‌های مسئله، شبکه شبیه‌سازی مورد نظر ترسیم می‌شود. در این شبکه سه ماشین به صورت سری با یکدیگر قرار گرفته‌اند و خروجی هر ماشین ورودی ماشین بعدی است (شکل ۲). همچنین، با توجه به اینکه این سه ماشین خود بخشی از سیستم است، نهادها با زمان‌های معین وارد سیستم (ماشین ۱) می‌شود. قبل از هر ماشین یک گره AWAIT قرار دارد که نهادها در آن منتظر می‌ماند، در صورتی که ماشین مشغول کار باشد یا عملیات نگهداری و تعمیرات روی آن انجام گیرد. در صورتی که ماشین در حال نگهداری و تعمیرات نباشد یا خرابی اتفاق نیفتاده باشد، فرایند روی نهادی آغاز می‌شود که در گره AWAIT منتظر بوده است. پس از اینکه فرایند به اتمام رسید، ماشین را گره FREE آزاد می‌کند و آماده خدمت‌دهی به نهادهای بعدی یا آغاز نگهداری و تعمیرات دوره‌ای است. در نهایت، گره COLCT و TERMIN قرار دارد که زمانی که نهاد در سیستم است، جمع‌آوری و نهاد



شکل ۲. شبکه شبیه‌سازی مربوط به خط تولید با سه ماشین سری



شکل ۳. شبکه شبیه‌سازی مربوط به نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه



شکل ۴. شبکه شبیه‌سازی مربوط به خرابی‌های پیش‌بینی نشده

ظرفیت ماشین و اپراتور آزاد می‌شود. در نهایت، نهاد وارد گره ASSIGN شده و تعداد خرابی‌های پیش‌بینی نشده شمارش می‌گردد.

شبکه مذکور برای سه شیفت، یعنی ۱۴۴۰ واحد زمانی اجرا می‌شود. اپراتور نگهداری و تعمیرات توانایی انجام نگهداری و تعمیرات دوره‌ای و سرویس خرابی را داراست و در شبکه فوق بین یک تا دو نفر تغییر می‌کند. در تصمیم‌گیری نهایی تعداد نفرات نگهداری و تعمیرات، مقدار کارایی، همچنین قابلیت دسترسی اپراتور دخیل است. شبکه مذکور شصت مرتبه و برای ترکیب‌های مختلفی از زمان‌های نگهداری و تعمیرات دوره‌ای اجرا و بررسی

در غیر این صورت، اگر زمان اتمام آخرین نگهداری و تعمیرات دوره‌ای کمتر از زمان مورد انتظار برای خرابی سیستم باشد، نهاد یک دوره دیگر منتظر می‌ماند و دوباره شرط مذکور بررسی می‌شود. در صورتی که شرط فوق برقرار باشد و خرابی اتفاق بیفتد، نهاد وارد گره PREEMPT می‌شود و بلافاصله ماشین مورد نظر وارد سرویس برای تعمیر می‌شود. سپس، نهاد وارد گره AWAIT شده و منتظر اپراتور نگهداری و تعمیرات می‌شود. زمانی که اپراتور نگهداری و تعمیرات به ماشین مورد نظر اختصاص یابد، بر اساس توزیع زمانی مشخص سرویس انجام می‌گیرد. سپس، نهاد وارد گره FREE شده و

- می‌شود. این مقادیر با استفاده از حدود بالا و پایین خرابی‌های ماشین بر اساس سوابق ماشین‌ها به دست آمده است. زمان‌های مختلف نگهداری و تعمیرات برای هر یک از ماشین‌ها (سناریوهای مختلف) در جدول ۲ نشان داده شده است.
- نتایج حاصل از اجرای شبیه‌سازی در جدول ۳ نشان داده شده است. پارامترهای این جدول به ترتیب عبارت‌اند از:
۱. تعداد اپراتور
 ۲. تعداد خرابی‌های پیش‌بینی نشده
 ۳. تعداد نگهداری و تعمیرات دوره‌ای
 ۴. انحراف از میانگین نت دوره‌ای
 ۵. میانگین طول صف/ماشین
 ۶. میانگین زمان انتظار/ماشین
 ۷. میانگین زمان انتظار/اپراتور
 ۸. میانگین به‌کارگیری ماشین
 ۹. میانگین به‌کارگیری اپراتور
 ۱۰. میانگین قابلیت دسترسی ماشین
 ۱۱. میانگین قابلیت دسترسی اپراتور.

جدول ۲. زمان‌های نگهداری و تعمیرات برای سناریوهای مختلف

شماره سناریو	ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳	شماره سناریو	ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳
1	70	70	80	31	70	80	70
2	80	70	80	32	80	80	70
3	90	70	80	33	90	80	70
4	70	80	80	34	70	90	70
5	80	80	80	35	80	90	70
6	90	80	80	36	90	90	70
7	90	90	80	37	70	70	90
8	70	70	70	38	80	70	90
9	80	70	70	39	70	80	90
10	90	70	70	40	80	80	90
11	70	80	70	41	90	80	90
12	90	80	70	42	70	90	90
13	80	90	70	43	80	90	90
14	90	90	70	44	80	90	100
15	70	70	90	45	80	100	60
16	80	70	90	46	100	90	80
17	70	80	90	47	100	100	100
18	80	80	90	48	100	90	80
19	90	80	90	49	100	100	70
20	70	90	90	50	100	100	100
21	80	90	90	51	80	60	50
22	70	70	80	52	60	50	50
23	80	70	80	53	110	100	100
24	80	80	80	54	110	80	80
25	90	80	80	55	100	110	80
26	70	90	80	56	120	110	110
27	80	90	80	57	110	110	110
28	90	90	80	58	110	100	90
29	70	70	70	59	120	120	120
30	80	70	70	60	95	95	95

جدول ۳. نتایج حاصل از شبیه‌سازی

۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	DMU
0.54	0.90	0.45	0.713	3.05	18.99	1.96	0.5773	47	0	1	1
0.55	0.9	0.44	0.716	2.6	19.31	2.37	0.5773	46	1	1	2
0.56	0.95	0.43	0.73	15.13	65.23	6.12	1	42	4	1	3
0.55	0.92	0.44	0.73	4.17	22.57	2.74	1	45	2	1	4
0.53	0.91	0.46	0.74	2.04	23.78	3.03	0.5773	44	4	1	5
0.61	0.90	0.38	0.72	4.7	20.44	2.13	0.5773	41	0	1	6
0.62	0.89	0.37	0.72	3.69	15.87	1.66	0.5773	40	0	1	7
0.52	0.90	0.47	0.72	1.64	18.83	1.96	0.5773	49	1	1	8
0.55	0.93	0.44	0.73	5.86	39.68	4.17	0.5773	46	3	1	9
0.56	0.90	0.43	0.73	3.01	22.65	2.34	2.0816	46	1	1	10
0.58	0.92	0.41	0.72	4.26	16.74	1.73	0.5773	47	0	1	11
0.58	0.92	0.41	0.72	6.23	40.82	4.22	1	42	1	1	12
0.59	0.9	0.4	0.72	2.72	17.54	1.82	2	45	0	1	13
0.6	0.89	0.39	0.73	1.62	19.99	2.09	2.0816	44	1	1	14
0.56	0.90	0.43	0.72	2.4	22.54	2.34	2.0816	46	0	1	15
0.59	0.90	0.4	0.72	3.46	16.5	1.72	1	45	1	1	16
0.6	0.89	0.39	0.72	3.17	15.94	1.65	1.5275	33	0	1	17
0.58	0.89	0.41	0.73	2.51	18.12	1.89	0.5773	41	2	1	18
0.57	0.9	0.42	0.72	3.5	26.8	2.81	0.5773	40	3	1	19
0.59	0.89	0.4	0.72	1.98	15.79	1.64	2.3094	43	0	1	20
0.61	0.87	0.38	0.72	2.16	17.14	1.79	0.5773	40	1	1	21
0.765	0.89	0.47	0.72	0.37	12.41	1.29	1.1547	49	1	2	22
0.735	0.90	0.52	0.75	0.12	20.86	2.42	1.1547	47	7	2	23
0.785	0.87	0.42	0.73	0.08	12.56	1.32	0	45	1	2	24
0.785	0.89	0.42	0.74	0.66	16.01	1.67	0.5773	44	2	2	25
0.765	0.90	0.46	0.74	1.04	20.39	2.12	2	45	3	2	26
0.805	0.91	0.38	0.69	9.44	22	2.19	0.5773	41	3	2	27
0.795	0.87	0.4	0.74	0.61	15.03	1.58	1.1547	41	3	2	28
0.75	0.9	0.49	0.72	0.33	14.04	1.46	0	51	1	2	29
0.77	0.88	0.45	0.72	0.26	13.64	1.41	1.1547	49	0	2	30
0.75	0.9	0.49	0.73	0.13	17.91	1.87	1.1547	49	2	2	31
0.77	0.88	0.45	0.72	0.29	14.19	1.46	1.1547	47	1	2	32
0.785	0.88	0.43	0.73	0.22	12.14	1.26	1.5275	46	1	2	33
0.76	0.89	0.47	0.73	0.38	19.43	2.02	2.3094	47	3	2	34
0.0785	0.87	0.42	0.72	0.1	11.3	1.17	2	45	0	2	35
0.795	0.87	0.4	0.73	0.03	10.49	1.09	2.0816	44	0	2	36
0.76	0.89	0.48	0.73	0.17	15.45	1.62	1.7320	48	3	2	37
0.76	0.914	0.47	0.75	1.36	44.87	4.74	1.5275	44	5	2	38
0.785	0.87	0.42	0.72	0.24	10.52	1.09	1.5275	46	0	2	39
0.785	0.87	0.42	0.73	0.03	12.44	1.29	0.5773	44	2	2	40
0.77	0.88	0.45	0.74	0.08	14.83	1.53	1.1547	41	5	2	41
0.8	0.87	0.39	0.73	0.16	8.32	0.87	2.0816	44	0	2	42
0.805	0.88	0.38	0.74	1.31	18.72	1.96	1.154	41	1	2	43
0.63	0.88	0.37	0.73	2.35	15.95	1.66	1	39	1	1	44
0.58	0.89	0.42	0.72	2.7	21.1	2.18	3.511	46	0	1	45
0.61	0.88	0.38	0.72	3.52	17.92	1.87	1.527	40	1	1	46
0.63	0.87	0.36	0.72	2.53	18.24	1.9	0	36	2	1	47
0.79	0.87	0.41	0.74	0.12	20.57	2.17	1.527	40	3	2	48
0.79	0.89	0.41	0.74	1.19	15.1	1.57	2.309	40	2	2	49
0.8	0.86	0.37	0.73	0.19	15.56	1.63	0	36	3	2	50
0.705	0.94	0.01	0.75	0.33	26.12	2.64	3.511	56	6	2	51
0.68	0.94	0.63	0.72	0.44	42.32	4.42	1.732	53	1	2	52
0.82	0.86	0.35	0.73	1.38	12.07	1.25	0.577	35	1	1	53
0.795	0.87	0.41	0.74	0.16	13.84	1.44	2.309	41	2	1	54
0.805	0.86	0.38	0.72	0	10.68	1.11	2.081	38	0	1	55
0.84	0.84	0.31	0.73	0.32	12.3	1.29	0.577	32	2	1	56
0.68	0.85	0.31	0.72	1.54	11.37	1.18	0	33	0	1	57
0.63	0.89	0.36	0.73	4.02	42.61	4.48	1	36	2	1	58
0.69	0.87	0.3	0.73	5.6	46.43	4.84	0.577	29	2	1	59
0.79	0.87	0.41	0.73	0.48	14.79	1.55	0	39	4	2	60

ماشین یا اپراتور مورد نظر قابلیت عملیاتی داشته است و قابل بهره‌برداری است.

۵. اجرای تحلیل پوششی داده‌ها

با توجه به اینکه در سیستم مذکور، برخی پارامترها ممکن است همبستگی داشته باشند، با استفاده از ضریب همبستگی اسپیرمن، میزان همبستگی پارامترهای مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شود که نتایج آن در جدول ۴ آمده است.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، تنها پارامترهای ۵ و ۶ همبستگی بالایی (بیش از ۰.۹۹) را نشان می‌دهند. بنابراین، پارامتر ۵ یعنی میانگین طول صف حذف و برای ۱۰ پارامتر باقی‌مانده تحلیل پوششی داده‌ها برای یافتن بهترین گزینه استفاده می‌شود. روش DEA مورد استفاده از نوع VRS است، و با توجه به اینکه برای اکثر پارامترها، مقادیر کمتر مطلوب است، مدل از نوع ورودی‌گرا انتخاب می‌شود. بنابراین، پارامترهایی که مقادیر بیشتر آن‌ها مطلوبیت دارد، باید به ورودی تبدیل شود؛ یعنی، حداکثر مقدار پارامتر محاسبه و بقیه مقادیر از آن کم می‌شود. پس از اجرای تحلیل پوششی داده، رتبه‌های به‌دست‌آمده به صورت جدول ۵ است.

همان‌گونه که جدول ۳ نشان می‌دهد، پارامترهای مختلفی از اجرای شبیه‌سازی به‌دست می‌آید. پارامتر ۱ نشان‌دهنده تعداد اپراتورهاست. پارامترهای ۲ و ۳ به ترتیب تعداد خرابی‌های پیش‌بینی‌نشده و تعداد نگهداری و تعمیرات دوره‌ای را نشان می‌دهند. تعداد خرابی‌های پیش‌بینی‌نشده سیستم نشان‌دهنده قابلیت اطمینان سیستم نیز است. پارامتر ۴ نشان‌دهنده انحراف از میانگین نگهداری و تعمیرات دوره‌ای است. هرچه این انحراف کمتر باشد، برنامه نگهداری و تعمیرات هماهنگی بیشتری دارد و برنامه‌ریزی آن به نحو بهتری صورت می‌گیرد. پارامترهای ۵ و ۶ نشان‌دهنده موجودی سیستم و میانگین قطعات داخل سیستم، همچنین میانگین زمان انتظار قطعات برای دریافت خدمت است. پارامتر ۷ معرف میانگین زمان انتظار برای اپراتور نگهداری و تعمیرات است. پارامترهای ۸ و ۹ درصد به‌کارگیری ماشین و اپراتور را نشان می‌دهد که هرچه این درصد بیشتر باشد، نشان‌دهنده همواربودن سیستم تولیدی و برنامه‌ریزی صحیح‌تر است. در نهایت، پارامترهای ۱۰ و ۱۱ نشان‌دهنده قابلیت دسترسی ماشین و اپراتور است که نشان می‌دهد چه مقدار از زمان مورد انتظار

جدول ۴. ضریب همبستگی بین پارامترهای مختلف

معیارها	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.3290	0.3840	0.1250	0.2432	-0.2301	-0.4926	0.3018	0.1965	-0.0923	0.5110
2	0.0660	0.0340	0.3778	0.3578	0.6380	0.0370	0.0713	-0.0713	0.2786	0.2400
3		0.3561	-0.0133	-0.0208	0.0123	-0.2036	0.0123	0.3171	0.5781	-0.1069
4			-0.0298	-0.0147	0.2098	-0.1925	0.2098	-0.1299	0.1769	-0.0412
5				0.9924	0.6474	0.1823	0.0841	0.6670	0.6670	-0.2492
6					0.6820	0.1547	0.0609	0.6620	0.6620	-0.2322
7						-0.3386	-0.0802	0.5408	0.5408	-0.3526
8							-0.1505	0.0160	0.0160	0.2881
9								0.1935	0.1935	-0.0457
10										-0.3410

نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتمی برای برنامه ریزی فعالیت های نگهداری و تعمیرات سیستم تولیدی ارائه شده است. این الگوریتم ادغامی، ترکیبی از شبیه سازی و تحلیل پوششی داده ها است. الگوریتم مذکور برای یک سیستم تولیدی شامل سه ماشین که به صورت سری به فعالیت می پردازند اجرا شده است. مسئله برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات از جنبه های گوناگون و با استفاده از روش های مختلفی بحث و بررسی شده است، اما به ترکیب شبیه سازی و تحلیل پوششی داده ها کمتر توجه شده است. این نکته زمانی اهمیت بیشتری می یابد که اهداف مختلفی را در نظر بگیریم و بخواهیم بهترین گزینه را انتخاب کنیم. در نتیجه، برای مسائل چندمعیاره تحلیل پوششی داده ها یکی از ابزارهای مناسب است. از دیگر مزیت های الگوریتم پیشنهادی، قابلیت تغییر پارامترهای مختلف و تحلیل حساسیت است. با تغییر پارامترهای ورودی مسئله می توان تأثیر هر یک را بر خروجی های مختلف آزمود. الگوریتم پیشنهادی مناسب برای مسائل کوچک و متوسط است و با افزایش تعداد ماشین ها، آزمودن گزینه های مختلف برای هر ماشین زمان بر خواهد شد. اما برای مسائل کوچک و متوسط می توان گزینه های متنوعی را آزمایش کرد و بهترین جواب را با توجه به شرایط مسئله به دست آورد. برای توسعه این الگوریتم، می توان آن را با روش های ابتکاری و فراابتکاری ترکیب کرد تا مسائلی با ابعاد بزرگ تر را حل نمود. استفاده از سایر روش ها برای حل مسائل چندمعیاره به مطالعه و بررسی بیشتری نیاز دارد.

جدول ۵. نتایج حاصل از تحلیل پوششی داده ها

رتبه	DMU	کارایی	رتبه	DMU	کارایی
1	52	1.17501	31	41	1.01088
2	38	1.09558	32	15	1.00985
3	51	1.08884	33	12	1.00692
4	57	1.08276	34	4	1.00531
5	5	1.08176	35	39	1.00461
6	23	1.06420	36	20	1.00461
7	3	1.06338	37	13	1.00454
8	55	1.06325	38	31	1.00450
9	29	1.05574	39	22	1.00403
10	43	1.05411	40	14	1.00386
11	59	1.04869	41	44	1.00338
12	27	1.04629	42	48	1.00327
13	11	1.04535	43	26	1.00291
14	56	1.04150	44	35	1.00264
15	9	1.04070	45	45	1.00258
16	54	1.04069	46	10	1.00246
17	17	1.03947	47	37	1.00236
18	8	1.02892	48	58	1.00232
19	42	1.02865	49	40	1.00230
20	53	1.02711	50	33	1.00163
21	1	1.02507	51	18	1.00103
22	60	1.02402	52	19	1.00037
23	24	1.02395	53	28	1.00019
24	49	1.02188	54	16	1.00000
25	47	1.02166	55	2	1.00000
26	50	1.02108	56	21	1.00000
27	30	1.02065	57	32	1.00000
28	36	1.01845	58	34	1.00000
29	6	1.01604	59	46	1.00000
30	25	1.01206	60	7	1.00000

مراجع

1. Nakagawa, T. (2005) "Maintenance theory of reliability." Springer Series in Reliability Engineering.
2. Marquez, A.C. and Gupta, J.N.D. (2006) "Contemporary maintenance management: process, framework and supporting pillars." Omega, Vol. 34, PP. 313-326.
3. Martin, H.H. (1997) "Contracting out maintenance and a plan for future research." Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 3 No. 2, PP. 81-90.
4. Ulusoy, G., Or, I. and Soydan, N. (1992) "Design and implementation of a maintenance planning and control system." International Journal of Production Economics, Vol. 24, PP. 263-272.
5. Ashayeri, J. (2007) "Development of computer-aided maintenance resources planning (CAMRP): A case of multiple CNC machining centers." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 23, PP. 614-623.
6. Quéré, Y. L., Sevaux, M., Tahon, C and Trentesaux, D. (2003) "Reactive Scheduling of Complex System Maintenance in a Cooperative Environment With Communication Times." IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART C: APPLICATIONS AND REVIEWS, Vol. 33, No. 2,

- PP. 225-234.
7. Ashayeri, J., Teelen, A. and Selen, W. (1996) "A production and maintenance planning model for the process industry." *International Journal of Production Research*, Vol. 34, PP. 3311-3326.
 8. Haghani, A. and Shafahi, Y. (2002) "Bus maintenance systems and maintenance scheduling: model formulations and solutions." *Transportation Research Part A*, Vol. 36, PP. 453-482.
 9. Ok, S.Y., Lee, S.Y. and Park, W. (2013) "Robust multi-objective maintenance planning of deteriorating bridges against uncertainty in performance model." *Advances in Engineering Software*, Vol. 65, PP. 32-42.
 10. Cassady, C. R. and Kutanoglu, E. (2005) "Integrating Preventive Maintenance Planning and Production Scheduling for a Single Machine." *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 54, No. 2, PP. 304-309.
 11. Worm, J. M. and Harten, A. V. (1996) "Model based decision support for planning of road maintenance." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 51, PP. 305-316.
 12. Mijailovic, V. (2003) "Probabilistic method for planning of maintenance activities of substation components." *Electric Power Systems Research*, Vol. 64, PP. 53-58.
 13. Higgins, A. (1998) "Scheduling of Railway Track Maintenance Activities and Crews." *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49, No. 10, PP. 1026-1033.
 14. Chen, T., Li, J., Jin, P. and Cai, G. (2013) "Reusable rocket engine preventive maintenance scheduling using genetic algorithm." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 114, PP. 52-60.
 15. Zheng, Y., Chen, S. and Ling, H. (2013) "Efficient multi-objective tabu search for emergency equipment maintenance scheduling in disaster rescue." *Optim Lett*, Vol. 7, PP. 89-100.
 16. Hadavi, S.M.H. (2008) "Risk-Based, genetic algorithm approach to optimize outage maintenance schedule." *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 35, PP. 601-609.
 17. Rezg, N., Xie, X. and Mati, Y. (2004) "Joint optimization of preventive maintenance and inventory control in a production line using simulation." *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 10, PP. 2029-2046.
 18. Rezg, N., Chelbi, A. and Xie, X. (2005) "Modeling and optimizing a joint inventory control and preventive maintenance strategy for a randomly failing production unit: analytical and simulation approaches." *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, No. 2-3, PP. 225 - 235.
 19. Roux, O., Jamali, M. A., Kadi, D. A and Chatelet, E. (2008) "Development of simulation and optimization platform to analyse maintenance policies performances for manufacturing systems." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 21, No. 4, PP. 407-414.
 20. Sarker, R. and Haque, A. (2000) "Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation." *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 24, PP. 751-760.
 21. Mjema, E.A.M. (2002) "An analysis of personnel capacity requirement in the maintenance department by using a simulation method." *Journal of Quality Maintenance Engineering*, Vol. 8, No. 3, PP. 253-273.
 22. Langer, R., Lia, J., Biller, S., Chang, Q., Huang, N. and Xiao, G. (2010) "Simulation study of a bottleneck-based dispatching policy for a maintenance workforce." *International Journal of Production Research*, Vol. 48, No. 6, PP. 1745-1763.
 23. White, E.S.W. (1998) "System modeling and simulation for predictive maintenance." *Cybernetics and Systems*, Vol. 29, No. 5, PP. 481-498.
 24. Yoo, J. and Garcia-Diaz, A. (2008) "Cost-effective selection and multi-period scheduling of pavement maintenance and rehabilitation strategies." *Engineering Optimization*, Vol. 40, No. 3, PP. 205-222.
 25. Goel, A. and Meisel, F. (2013) "Workforce routing and scheduling for electricity network maintenance with downtime minimization." *European Journal of Operational Research*, Vol. 231, No. 1, PP. 210-228.
 26. Ali, A.I. and Lerme, C.S. (1997) "Comparative advantage and disadvantage in DEA." *Annals of Operations Research*, Vol. 73, Issue 0, PP. 215-232.

27. Bilinton, R. and Allan, R.N. (1992) "Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques." Springer US.
28. Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E. (1978) "Measuring the efficiency of decision making units." European Journal of Operational Research, Vol. 2, No. 6, PP. 429-444.

جدول پیوست ۱. داده‌های مربوط به مطالعه موردی

دوره	زمان سرویس خرابی			فاصله بین دو خروجی متوالی			فاصله بین دو خرابی متوالی			زمان سرویس نگهداری و تعمیرات دوره‌ای		
	ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳	ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳	ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳	ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳
1	18.95	12.27	16.02	6.23	8.53	7.48	42.61	14.13	62.92	15.01	17.28	15.72
2	16.63	15.06	17.03	6.28	10.57	7.56	58.44	57.26	23.43	15.20	15.35	15.00
3	18.16	23.35	17.58	6.71	5.20	7.61	1.35	37.71	56.30	12.70	12.53	15.67
4	15.06	12.57	12.69	6.00	5.11	7.57	40.50	105.44	121.24	16.32	13.07	9.30
5	14.79	14.61	13.97	6.90	5.11	7.53	1.29	49.48	142.48	13.76	15.18	11.47
6	21.31	10.58	5.89	6.54	7.64	7.63	49.85	7.92	22.68	11.01	13.51	14.08
7	18.67	15.92	17.44	6.48	11.81	7.50	77.38	200.14	73.01	11.54	14.52	10.00
8	14.79	18.99	9.65	7.07	6.67	7.58	104.06	74.68	28.14	13.79	11.61	11.37
9	19.22	19.00	16.63	6.78	5.76	7.60	37.13	8.92	156.60	13.42	11.43	10.46
10	17.55	18.75	16.12	6.06	6.80	7.64	6.17	54.92	33.61	10.90	11.80	14.18
11	19.25	6.68	12.88	6.55	7.13	7.56	82.33	52.64	84.44	7.63	15.75	13.33
12	18.14	17.22	12.90	7.04	5.99	7.48	26.82	246.65	8.42	14.02	15.55	14.23
13	12.79	16.31	21.52	7.04	3.50	7.57	158.22	18.91	26.75	14.98	13.35	11.88
14	15.58	17.01	18.43	6.95	8.69	7.64	65.62	216.74	148.66	16.54	17.25	12.34
15	15.22	10.98	19.19	7.08	5.93	7.60	64.31	193.77	1.46	13.29	12.67	14.01
16	12.63	15.15	13.57	6.72	6.51	7.58	104.53	2.75	53.08	14.92	14.29	12.48
17	14.86	16.49	8.77	6.74	4.25	7.56	45.13	52.94	21.82	13.81	15.41	11.30
18	14.98	12.78	16.11	6.85	3.94	7.58	47.50	33.61	9.07	14.31	15.46	13.95
19	11.99	6.54	10.61	6.68	5.45	7.64	63.79	94.37	76.77	11.62	17.02	9.86
20	17.26	13.08	13.93	6.62	7.01	7.46	153.79	0.26	126.59	16.66	15.33	10.70
21	16.53	11.91	17.79	7.03	5.38	7.49	332.79	42.74	13.31	17.52	14.24	9.84
22	18.33	20.93	13.06	6.99	9.30	7.47	46.76	215.44	33.35	12.46	16.35	13.02
23	17.19	20.35	13.73	7.07	9.31	7.49	41.04	40.94	21.53	8.94	15.39	13.15
24	10.85	20.47	13.91	6.60	6.06	7.61	22.30	117.47	28.17	15.70	10.02	15.03
25	13.76	16.74	13.19	6.03	5.79	7.57	22.12	72.05	15.48	12.62	15.82	11.26
26	13.81	12.07	12.49	6.65	6.01	7.53	32.29	14.44	22.20	8.33	12.74	17.72
27	12.16	17.10	14.57	6.55	9.93	7.54	32.56	79.30	93.50	10.91	14.59	12.62
28	20.13	15.60	10.61	6.87	5.09	7.56	17.16	150.45	8.19	15.35	16.93	12.97
29	18.00	17.51	10.07	6.95	4.31	7.52	98.13	38.30	23.69	21.74	15.17	11.63
30	15.19	17.59	13.78	7.08	6.63	7.56	147.36	82.32	69.86	13.42	15.77	13.95