

طراحی فرایندهای کسب و کارهای کوچک و متوسط حوزه کالاهای فاسد شدنی به منظور طراحی سیاست بهینه تولید با رویکرد شبیه سازی

سید مجتبی سجادی^{۱*}، فرشته توان^۲، جلیل حیدری دهویی^۳

۱. استادیار دانشکده کارآفرینی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. کارشناس ارشد کسب و کار، دانشکده کارآفرینی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استادیار دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پذیرش: ۹۴/۰۸/۰۹

دریافت: ۹۴/۰۲/۱۷

چکیده

در دنیای رقابتی امروز، اهمیت کنترل تولید و موجودی در شرکت های کوچک و متوسط با توجه به تأثیر عواملی همچون نوسان های تقاضا و خرابی ماشین آلات بر تولید، بیشتر از گذشته مورد توجه مدیران قرار گرفته است. سیستم های مستعد شکست زیرمجموعه ای از سیستم های تولیدی است که فرض خرابی ماشین آلات در آنها در نظر گرفته شده است. در این مقاله یک سیستم شبکه ای مستعد شکست چند محصولی با کالاهای فاسد شدنی مورد مطالعه قرار می گیرد. سیاست کنترلی تولید بر مبنای سیاست نقطه محدودکننده شامل تولید بیش از میزان مورد نیاز و نگهداری محصول در زمان هایی که ماشین سالم است بوده تا در دوره هایی که ماشین دچار خرابی می شود، برای جلوگیری از کمبود موجودی بتوان از آنها استفاده نمود. تقاضا در این سیستم ثابت است و کمبود (نسبتی از پس افت و فروش از دست رفته) مجاز است. هدف اصلی از این مقاله، تعیین نرخ بهینه تولید به گونه ای است که امید ریاضی مجموع هزینه های تولید، نگهداری، کمبود و فساد کالا کمینه شود. به منظور تعیین نرخ بهینه تولید به دلیل قطعیت نداشتن و پیچیدگی این گونه سیستم ها، بهینه سازی بر مبنای شبیه سازی با استفاده از نرم افزار ARENA انجام شده است. در نهایت یک مثال عددی، کارایی رویکرد پیشنهادی را ارائه می دهد.

واژه های کلیدی: فرایندهای کسب و کار، کسب و کارهای کوچک و متوسط، کالاهای فاسد شدنی، شبیه سازی.



۱- مقدمه

امروزه انتظار می‌رود که مدیران همگی توانمندی مدیریت تغییر و تحول را داشته و به‌طور دائم در جستجوی راه‌هایی برای بهبود بخش مربوط به خود در سازمان باشند [۱، ص ۲۱۲]. یکی از حوزه‌هایی که به‌طور ویژه نیازمند برنامه‌ریزی و بهبود مستمر می‌باشد، بخش تولید سازمان است. برنامه‌ریزی تولید، یک فعالیت اساسی در هر سیستم ساخت و تولید است و به‌طور طبیعی تخصیص منابع در دسترس را برای عملیات مورد نیاز به کار می‌برد [۲، ص ۳۰۸]. خرابی ماشین‌آلات در سیستم‌های تولیدی امری اجتناب‌ناپذیر است و این موضوع در فرایند تولید اختلال ایجاد می‌کند [۳، ص ۹]. و نتایجی همچون هزینه‌های روبه‌رو شدن با کمبود کالا و مواد اولیه و قطعات یدکی، مشکلات توقف تولید، از دست رفتن فرصت فروش کالا و کسر اعتبار سازمان را در بر خواهد داشت [۴، ص ۲۸]. هدف برنامه‌ریزی تولید، بهینه‌سازی تصمیم‌های برنامه‌ریزی و رابطه جانشینی بین اهداف اقتصادی مثل کمینه کردن هزینه‌هاست. برای دستیابی به این هدف، سیستم‌های برنامه‌ریزی ساخت و تولید با توجه به افزایش تولید و انعطاف‌پذیری در ارضای تقاضای مشتری بسیار پیچیده‌تر می‌شود [۵، ص ۲۸]. از این رو می‌توان گفت که هزینه و سودهای هر سیستم تحت تأثیر تصمیم‌گیری‌های مربوط به موجودی می‌باشد. به دلیل پیچیدگی سیستم‌های تولیدی، انواع مختلفی از مدل‌ها، مستقل از مدل‌های برنامه‌ریزی تولید به منظور مواجهه با شرایط قطعیت نداشتن در سیستم‌های تولیدی شکل گرفته‌اند که سیستم‌های تولیدی مستعد شکست از جمله آنها می‌باشد [۶، ص ۴۲۳].

مدل موجودی مورد مطالعه در این پژوهش مربوط به سیستم تولید غیرپایداری است که به صورت شبکه‌ای بوده و امکان خرابی و از کارافتادگی ماشین‌آلات در آن وجود دارد. سیستم‌های تولیدی غیرپایدار زیرشاخه‌ای از مدل‌های برنامه‌ریزی تولید است که فرض خرابی و تعمیر تصادفی ماشین‌ها و تجهیزات به آن وارد شده است [۴، ص ۹]. هدف سیستم‌های تولیدی مستعد شکست، تعیین نرخ بهینه تولید است، به‌طوری که امید ریاضی مجموع هزینه‌های، نگهداری، کمبود و فساد در یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت کمینه شود.

در این مقاله نخست پیشینه تحقیق بررسی شده و ضمن بیان ضرورت، خلأ تحقیق شناسایی می‌شود. سپس مسئله مدنظر در این مقاله به همراه تعاریف مورد نیاز معرفی شده است. در ادامه پس از بیان سؤال‌های تحقیق و روش تحقیق، نتیجه تجزیه و تحلیل حساسیت

روی داده‌ها ارایه شده است که در نهایت بحث و نتیجه‌گیری در خصوص یافته‌های تحقیق ارائه خواهد شد.

۲- پیشینه تحقیق

کته و غربی کنترل بهینه را برای یک سیستم تولیدی تک‌ماشینی و دو محصولی همراه با وقوع خرابی و تعمیر تصادفی ارائه کردند [۷، ص ۲۸۵]. در تحقیق آنها فرض شده است که فرایند ظرفیت ماشین به صورت زنجیره مارکوف می‌باشد. هدف مسئله، انتخاب نرخ تولیدی است که هزینه تخفیف مورد انتظار موجودی/ انبار را در یک افق زمانی نامحدود کمینه سازد. نتایج مشخص می‌کند که سیاست نقطه محدودکننده بهینه همچنین برای محدوده وسیعی از مسائل پیچیده کاربرد دارد. چان و همکاران [۸، ص ۱۵۲۸] یک سیاست نقطه محدودکننده دوسطحی برای کنترل یک سیستم ساخت و تولید با فرض وجود زمان تأخیر و تقاضای غیرقطعی و ظرفیت اضافی ارائه کردند. با تحلیل توزیع احتمالی حالت‌های سیستم، مقدار بهینه دو سطح محدودکننده به دست آورده شد. سپس توسط آزمایش‌های عددی به منظور تحقیق اثربخشی سیاست کنترلی و بهبود سطوح کنترلی انجام شد. برنات و همکارانش نگهداری، تعمیرات پیشگیرانه و مسئله کنترل موجودی یک سیستم تولیدی تک محصولی و تک ماشینی با خرابی‌های تصادفی را بررسی کردند [۹، ص ۶۰]. هدف مطالعه آنها یافتن نرخ تولید و برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به گونه‌ای است که هزینه کل نگهداری و تعمیرات موجودی/ انبار کمینه گردد. در این تحقیق یک توصیف از سیاست نزدیک به بهینه با ساختاری ساده به همراه به‌کارگیری یک روش عددی انجام شده است. همچنین یک روش مبتنی بر شبیه‌سازی به منظور دستیابی به یک تقریب نزدیک از پارامترهای کنترلی بهینه اتخاذ شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیاست کنترلی نزدیک به بهینه در مقایسه با ترکیب یک سیاست نقطه محدودکننده و یک سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه متناوب کلاسیک، منجر به کاهش قابل توجهی در هزینه خواهد شد. سجادی و همکاران یک سیستم متشکل از شبکه‌ای از ماشین‌ها با زمان تعمیر و شکست تصادفی در نظر گرفته‌اند [۱۰، ص ۳۵]. ماشین آلات در این سیستم می‌توانند در یکی از چهار حالت عملیاتی، تعمیر، خراب، و مسدود شده باشند. هدف از طرح این مسئله، پیدا کردن نرخ تولید و سیاست‌های ماشین‌های مختلف برای به حداقل رساندن



هزینه متوسط موجودی و هزینه پس‌افت در درازمدت است. آنها برای کنترل نرخ تولید ماشین‌آلات، یک روش مبتنی بر ترکیب تئوری کنترل بهینه احتمالی، شبیه‌سازی رویداد گسسته، طراحی آزمایش و متدولوژی سطح پاسخ توسعه داده‌اند. مدل آنها می‌تواند برای سیستم‌هایی با نرخ خرابی وابسته به عمر، سیاست نگهداری و تعمیر پیشگیرانه و زمان‌های توزیع غیرنمایی توسعه داده شود. دهام و همکاران کنترل همزمان تولید، تعمیر / جایگزینی و نگهداری تعمیرات پیشگیرانه سیستم‌های ساخت و تولید دارای کالای فاسد شدنی را انجام دادند [۱۱، ص ۲۷۱]. هدف از انجام این مقاله، پیدا کردن متغیر تصمیم برای کنترل همزمان تولید در سیستم‌های تولیدی فاسدشدنی و مینیم کردن هزینه‌های تعمیر/جایگزینی و نگهداری تعمیرات پیشگیرانه و هزینه‌های نگهداری و کمبود پس‌افت موجودی در طول یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت است. روش حل آنها بر مبنای فرایند تصمیم‌گیری نیمه مارکوفی و روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی قرار دارد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با این روش عمر ماشین‌ها افزایش پیدا کرده و از خرابی‌های احتمالی کاسته و به تبع آن هزینه‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. حجبی و همکاران خصوصیات تولیدات یکپارچه و بهره‌وری تصمیم‌گیری را در سیستم‌های ساخت و تولید غیر قابل اطمینان بررسی کردند [۱۲، ص ۳۲]. این مقاله با هدف ماکزیم‌سازی میانگین زمان سوددهی ترکیبی در کیفیت و کمیت تولید انجام شد. در این مدل کیفیت و کمیت تولید وابسته به سود حاصل از فروش، هزینه‌های کمبود موجودی و فروش از دست رفته است. همچنین توزیع زمان خرابی و شکست ماشین غیر نمایی می‌باشد. آن‌ها مدلی با ترکیبی از شبیه‌سازی و طراحی آزمایشات و کنترل کیفیت ارائه دادند. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که شبیه‌سازی مبتنی بر رویکرد ارائه شده، یک رویه مناسب برای کنترل سیستم‌های ساخت و تولید در سطوح عملیاتی به حساب می‌آید. دهیب و همکاران [۱۳، ص ۱۲۶] یک روش یکپارچه برای بهینه‌سازی توأم کنترل تولید - موجودی و سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای یک سلول تولیدی ارائه دادند. سیاست کنترل تولید - موجودی مبتنی بر سیاست نقطه محدودکننده شامل ساخت و نگهداری یک ذخیره اطمینان از محصولات تمام شده می‌باشد. هدف اصلی این مقاله تعیین سیاست بهینه‌سازی توأمی است که هزینه کلی را کمینه سازد که شامل هزینه‌های راه‌اندازی، نگهداری و تعمیرات، نگهداری موجودی و کمبود می‌باشد. دان و لیو برای زنجیره تأمین مدیریت موجودی با کالای فاسد شدنی، از بهینه‌سازی

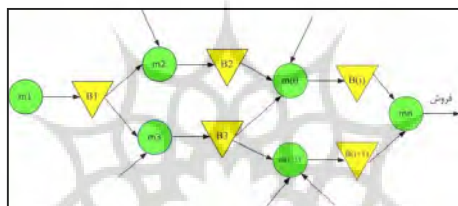
شبیه‌سازی استفاده کردند [۱۴، ص ۶۵۸]. سیاست بازپرسازی بر مبنای نسبت موجودی گذشته است که به آن نرخ موجودی قدیمی گفته می‌شود. کارایی سیاست جدید برای یک زنجیره تأمین شامل یک تأمین‌کننده و تعدادی خریدار است. هدف مطالعه چنین سیستم‌هایی، تعیین میزان موجودی است که شامل ماکزیم کمبود مجاز برای حداقل کردن نرخ فساد مجاز است. سلیمانی یک مدل نگهداری تعمیرات پیشگیرانه را در سیستم‌های تولیدی مستعد شکست با استفاده از روش‌های متاهوریستیک ارائه کرد [۱۵، ص ۱]. هدف از انجام این پژوهش تعیین نرخ تولید و پارامتر سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است، به طوری که هزینه تعمیرات و هزینه موجودی و کمبود حداقل شود. نرخ تقاضا ثابت و توزیع زمان خرابی ماشین توزیع نمایی و زمان تعمیرات یکنواخت فرض شده است، همچنین سیاست نقطه محدودکننده یک سیاست بهینه برای این مسئله می‌باشد. مثال عددی ارائه شده نشان داد که به ازای مقادیر مختلف سطح به سیستم تحمیل می‌شود. بهرامی یک مدل برای محاسبه نرخ تولید مربوط به سیستم‌های تولیدی مستعد شکست ارائه کرد که قابلیت شکست ماشین‌آلات در آنها وجود دارد [۱۶، ص ۱]. در این پژوهش فرض شده است که محصول نهایی، فاسد شدنی می‌باشد و ماشین‌آلات به طور تصادفی با شکست مواجه می‌شوند. تعریف مدل ریاضی مجموع هزینه‌ها، شبیه‌سازی در فضای نرم‌افزاری ارنا، قابلیت عملی کردن مدل در کارخانجات و نیز دستیابی به نرخ بهینه تولید به ازای مقادیر مختلف متغیرها از اهداف این پژوهش است. تحلیل حساسیت انجام گرفته بر مدل نشان داد که مدل شبیه‌سازی شده قابلیت پاسخ‌گویی به اهداف پژوهش را دارد. فرزام‌راد یک مدل برنامه‌ریزی تولید چند دوره‌ای چند محصولی چند هدفه را با استفاده از شبیه‌سازی ارائه کرد [۱۷، ص ۱] در این پژوهش یک سیستم تولیدی چند دوره‌ای چند محصولی در یک فرایند تولید دسته‌ای در دو حالت قطعی و پیوسته مورد مطالعه قرار گرفته و با نرم‌افزار ارنا شبیه‌سازی شده است. هدف از شبیه‌سازی این پژوهش تعیین اندازه دسته تولید محصولات در دوره‌های مختلف است که سه هدف کمینه کردن کل هزینه‌های تولید، یکنواخت کردن اندازه دسته تولید و نزدیک کردن سیستم، به سیستم JIT می‌باشد. عاملیان و همکاران در مقاله‌ای با عنوان تعیین نرخ بهینه تولید و دوره تعمیرات پیشگیرانه در سیستم‌های تولیدی مستعد شکست با رویکرد بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی، به بررسی کنترل تولید در یک سیستم مستعد شکست پرداختند [۱۸، ص ۴۸۳]. در این مقاله قابلیت اطمینان ناشستن در



سیستم‌های مستعد شکست به دلیل خرابی تصادفی و نیز تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه برای کاهش عدم قطعیت آنها در نظر گرفته شده است. هدف این مقاله تعیین نرخ بهینه تولید و زمان تعمیرات پیشگیرانه برای یک سیستم مستعد شکست با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های نگهداری، کمبود و تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه می‌باشد. برای این منظور از شبیه‌سازی گسسته پیشامد استفاده شده است. نتایج این مقاله نشان‌دهنده کارایی این روش حل در مقایسه با حالاتی است که امکان حل تحلیل به دلیل پیچیدگی توابع چگالی احتمال عمومی وجود ندارد. مدل کنترل موجودی قطعی برای کالاهای فسادپذیر با در نظر گرفتن کمبود پس‌افت و تخفیف مقداری را توسعه دادند محمد مهدوی مزده و همکاران [۱۹، ص ۶۹]. در این مقاله به بررسی مدل کنترل موجودی برای کالاهای فسادپذیر با در نظر گرفتن تخفیف مقداری از سوی فروشنده و همچنین مجاز بودن کمبود، زمانی که نرخ تقاضا به صورت ثابت سالیانه می‌باشد، پرداخته شده است. در این مدل فرض شده است که سیستم موجودی تک کالایی، نرخ فساد ثابت، کمبود به صورت پس‌افت کامل و مدت زمان تحویل کالا نیز برابر صفر است. پس از مدل‌سازی مسئله و به دست آوردن تابع هدف مدل، نخست یک روش حل دقیق، الگوریتم ساده و کارآمد برای یافتن مقادیر بهینه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که همواره با افزایش نرخ فساد، میزان هزینه‌های موجودی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین لازم است با به‌کارگیری روش‌های مناسب نگهداری محصول و کاهش نرخ فساد تا حد امکان، هزینه‌های موجودی را کاهش داد. در حوزه کاربرد شبیه‌سازی نیز سجادی و عظیمی مقاله‌ای با عنوان بهینه‌سازی تعداد تجهیزات شعب بانک به کمک شبیه‌سازی و الگوریتم تبرید را ارائه دادند [۲۰، ص ۲۳۰]. در این مقاله یک مدل ریاضی را با هدف کمینه‌سازی ارائه دادند. برای حل مدل در هر مرحله جوابی موجه شبیه‌سازی شده است که به عنوان ورودی به روش فراابتکاری تبرید انتخاب می‌شود. به این ترتیب در این مقاله ضمن ساخت مدلی ریاضی و حل آن به وسیله ابزارهای فراابتکاری و شبیه‌سازی، مناسب‌ترین پاسخ انتخاب شد. نتایج حاصل از انجام این پژوهش نشان می‌دهد که می‌توان در هزینه تجهیزات و مشتریان از دست رفته صرفه‌جویی کرد که این عدد برای یک شعبه بانک بسیار قابل توجه است.

۳- بیان مسئله

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، سیستم‌های تولیدی شبکه‌ای از n ماشین تشکیل شده است که در هر مرحله یک محصول تولید می‌شود. محصول مرحله ۱ در تولید محصول مرحله ۲ و ۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین ترتیب تا تولید محصول نهایی پیش می‌رود. بین هر دو ماشین یک انبار موجود است. نرخ تقاضا در سیستم ثابت و معلوم بوده، و در دو مرحله آخر از تولید، کمبود از نوع پس‌افت و سفارش عقب افتاده مجاز است. محصول تولیدی اگر تا تاریخ مورد نظر، مورد مصرف قرار نگیرد دیگر قابل توزیع نمی‌باشد.



شکل ۱ سیستم‌های تولید شبکه‌ای مستعد شکست

در زمان سالم بودن ماشین‌ها، محصولات با نرخ $U_i(t)$ تولید می‌شوند. بعد از قسمت تولید، انباری وجود دارد که میزان موجودی باقیمانده در آن انبار می‌شود تا در زمان خرابی ماشین مرحله $(i - 1)$ ، تولید محصول متوقف نشود. وقتی ماشین i شروع به تولید می‌کند مواد از انبار مرحله $(i - 1)$ با نرخ تولید U_i برای یک فاصله زمانی $t_i = X_i / U_i$ مصرف خواهد شد. در زمان t_i ، ماشین i شروع به خارج کردن محصول می‌کند که به طور فوری به سطح موجودی قابل دسترس برای مرحله $(i + 1)$ اضافه می‌شود. این موجودی تا زمان $t_i + t_i$ که ماشین سالم است به‌طور پایدار در حال افزایش خواهد بود [۲۱، ص ۳۶۷] تا به نقطه Z^* می‌رسد. این سطح بهینه را می‌تواند برای تصمیم‌گیری در مورد نرخ بهینه تولید مورد استفاده قرار گیرد؛ به عبارت دیگر متغیر تصمیم سیستم‌های مستعد شکست با توجه به این سطح بهینه مشخص می‌شود. این رابطه در قالب سیاست نقطه محدودکننده (HPP) شناخته شده است. در این سیاست در صورتی که ماشین سالم بوده و سطح موجودی در دست، زیر سطح بهینه



باشد، تولید باید بیش از نرخ تقاضای جاری سیستم صورت گیرد تا مازاد بر آن باعث افزایش سطح موجودی در دست تا رسیدن به سطح بهینه شود [۳، ص ۱۲]. در زمان خرابی ماشین‌ها، یعنی بعد از این نقطه زمانی، ورودی قطع شده و محصول با نرخ d مصرف می‌شود و سطح موجودی پایین می‌آید. ممکن است موجودی انبار نیز تمام شود که در این صورت، سیستم با کمبود (پس‌افت) روبه‌رو می‌شود. همچنین تابع تولید و خرابی ماشین‌آلات از توزیع نمایی پیروی می‌کنند و تقاضا ثابت و معلوم است. در این پژوهش تولید مواد شیمیایی به‌طور پیوسته صورت گرفته ولی در بسته‌بندی‌هایی به صورت گسسته در انبار ذخیره و سپس توزیع می‌شود. همچنین اگر محصول نهایی تا تاریخ مشخص مصرف نشود، جزو کالاهای فاسد بوده و غیر قابل استفاده می‌باشد. اگر $X_i(t)$ میزان موجودی در دست باشد، براساس فرمول ۱ خواهیم داشت :

$$U(t) = \begin{cases} U_{max} & x(t) < Z^* \\ D & x(t) = Z^* \\ \cdot & x(t) > Z^* \end{cases} \quad (۱)$$

نمادها و معادلات به‌کار گرفته شده در این مقاله به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۰، ص

:۳۷]

M_i : ماشین آم

B_i : انبار مربوط به ماشین آم

n : تعداد محصولات یا ماشین‌ها

d : نرخ تقاضای ثابت برای محصول نهایی

h_i : هزینه نگهداری موجودی در واحد زمان برای هر واحد محصول i ($i = ۱, ۲, \dots, n$)

$\hat{\pi}_i$: هزینه کمبود به ازای هر واحد تقاضای ارضا نشده محصول i ($i = n$)

C_p : هزینه فساد در واحد زمان به ازای هر واحد محصول i ($i = n$)

C_i : هزینه تولید هر واحد محصول i ($i = n$)

$u_i(t)$: نرخ تولید ماشین i ($i = ۱, ۲, \dots, n$)

$U(t)$: بردار سیاست کنترلی

$x_i(t)$: سطح موجودی انبار آم در زمان t ($i = ۱, ۲, \dots, n$)

Z_i : پارامتر سطح آستانه انبار آم

K : آستانه کمبود برای محصول نهایی

$K(t)$: تابع هزینه میانگین هزینه طول اجرای شبیه‌سازی مورد انتظار

l_{ij} : ضریب مصرف محصول i که در تولید محصول j مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$\lambda_{\alpha\beta}^i$: نرخ انتقال ماشین از حالت α به حالت β

$P(t)$: تعداد کالای فاسد شده از محصول i ($i = n$)

$\zeta_i(t)$: فرایند مارکوف تصادفی ماشین i در زمان t

هر ماشین حداکثر نرخ تولید دارد که به صورت فرمول‌های ۲ و ۳ تعریف می‌شود و شرط پایایی سیستم و توانمند بودن آن در ارضای تقاضای ماشین‌های میانی و همچنین تقاضای محصول نهایی به حساب می‌آید.

$$u_i^{max}(t) > \sum_{i < j} l_{ij} u_j^{max} \quad i \neq n \quad (2)$$

$$u_n^{max}(t) > d \quad (3)$$

معادلات مربوط به حالت ماشین. وضعیت خرابی ماشین i در زمان t با استفاده از نماد $\zeta_i(t)$ نشان داده می‌شود و به صورت زیر است:

$$\zeta_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{ماشین } i \text{ در حال تعمیر باشد} \\ 1 & \text{ماشین } i \text{ در حال عملیات و یا آماده عملیات باشد} \end{cases} \quad (4)$$

اگر $B = \{0, 1\}$ و $\lambda_{\alpha\beta}^i$ نرخ انتقال ماشین از وضعیت α به وضعیت β باشد، خواهیم داشت:

$$\lambda_{\alpha\beta}^i \geq 0, \lambda_{\alpha\alpha}^i = -\sum_{\beta \in B} \lambda_{\alpha\beta}^i, \alpha \neq \beta \in B \quad (5)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{O(\delta t)}{\delta t} = 0 \quad (6)$$

$$P[\zeta_i(t + \delta t) = \beta | \zeta_i(t) = \alpha] = \begin{cases} \lambda_{\alpha\beta}^i \delta t + O(\delta t) & \text{if } \alpha \neq \beta \\ 1 + \lambda_{\alpha\alpha}^i \delta t + O(\delta t) & \text{if } \alpha = \beta \end{cases} \quad (7)$$

مجموعه معادلات ۵-۷ بیانگر خاصیت بی‌حافظه بودن توزیع نمایی (متغیرهای مدت زمان بین خرابی‌ها و زمان تعمیر ماشین‌آلات) است.



معادلات مربوط به سطح موجودی. معادلات مربوط به سطح موجودی محصولات میانی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$x_i(t) = \int (u_i(t) - \sum_{j>i} l_{ij} u_j(t)) dt, \quad x_i(\cdot) = x_i^*, \quad 1 \leq i < n, \quad (8)$$

$x_i(t)$: integer

که x_i^* میزان موجودی اولیه و $x_i(t)$ سطح موجودی انبار B_i در زمان t تعریف می‌شود. معادله سطح موجودی محصول نهایی نیز با در نظر گرفتن فساد کالا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$x_n(t) = \int [u_n(t) - d(x_n(t)) - P(t)] dt, \quad x_n(\cdot) = x_n^* \quad (9)$$

$$d(x_n(t)) = \begin{cases} d & x_n(t) \geq -K \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (10)$$

محدودیت‌های مرتبط با سطح موجودی محصولات میانی و محصول نهایی در انبارها نیز به ترتیب به صورت معادلات ذیل بیان می‌شوند:

$$-K \leq x_n(t) \leq Z_n \quad (11)$$

$$0 \leq x_i(t) \leq Z_i \quad i \neq n$$

معادله (۱۱) نشان می‌دهد که تنها تعداد K واحد کمبود از نوع پس افت مجاز بوده و تقاضای مازاد به صورت فروش از دست رفته تلقی می‌شود. در مورد انبارهای میانی این مطلب صادق نیست.

نرخ تولید هر ماشین با توجه به سالم یا خراب بودن آن به صورت زیر مطرح می‌شود:

$$u_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } \zeta_i(t) = 0 \\ [\cdot, u_i^{\max}] & \text{if } \zeta_i(t) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

$U(t)$ بردار نرخ تولید ماشین‌ها است که به عنوان متغیر تصمیم این سیستم در نظر گرفته شده است. مجموعه سیاست کنترلی قابل قبول، $k(\alpha)$ ، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k(\alpha) = \{U(t) \in \mathbb{R}^n \mid 0 \leq u_i(t) \leq u_i^{\max} \quad 1 \leq i \leq n\} \quad (13)$$

تابع هدف دیگر مسئله با در نظر گرفتن فساد کالا به گونه‌ای تعریف می‌شود که امید ریاضی مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری، کمبود و فساد در واحد زمان کمینه شود:

$$J(\alpha, x, u, P) = \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \int_0^T [h_i x_i^+(t) + \hat{\pi}_i x_i^-(t) + C_p P(t) + \sum_i^n C_i X_i] dt \mid X(\cdot) = X., \quad \zeta(\cdot) = 1 \right\} \quad (14)$$

و

$$x_i^+(t) = \text{Max}(x_i(t), \cdot) \quad (۱۶)$$

$$x_i^-(t) = \text{Max}(-x_i(t), \cdot) \quad (۱۷)$$

برای نشان دادن مقدار بهینه تابع هدف از $v(\alpha, x)$ استفاده شده است و برابر است با:

$$v(\alpha, x) = \min_{u \in k(\alpha)} J(\alpha, x, u, P) \quad (۱۸)$$

در بازارهای رقابتی به دلیل وجود نوسان‌های تقاضا و به تبع آن مواجه شدن با مسئله کمبود در دوره بالا رفتن تقاضا، سیستم‌های تولیدی که با کمبود مواجه شده‌اند، متحمل خسارت‌ها و زیان‌هایی شده که ممکن است اعتبار سیستم را از بین ببرند. همچنین ممکن است در دوره‌ای که تقاضای کالا نسبت به دوره‌های قبل کمتر است کالا به مدت طولانی در انبار نگهداری شده و سیستم متحمل هزینه‌های هنگفت نگهداری و در نهایت از بین رفتن کالاها شود. در چنین محیط رقابتی، وجود یک سیستم برنامه‌ریزی شده دقیق اهمیت بسیاری پیدا می‌کند که این امر مستلزم به‌کارگیری روش‌های علمی برنامه‌ریزی تولید است. با توجه به موارد بالا می‌توان ضرورت انجام این پژوهش و اهمیت آن را توجیه کرد.

۴- تعاریف مفهومی ضروری

۴-۱- سیستم‌های شبکه‌ای مستعد شکست

سیستم‌های تولیدی شبکه‌ای مستعد شکست، متشکل از n ماشین و زیرمجموعه‌ای از مدل‌های برنامه‌ریزی تولید و سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر می‌باشد که به‌منظور مواجهه با شرایط قطعیت در سیستم‌های تولیدی شکل گرفته‌اند. در این نوع سیستم‌ها، ماشین‌ها با نرخ تولید متغیر به هم متصل شده‌اند تا نیاز مشتریان برآورده شود. همچنین ماشین‌ها به طور تصادفی خراب شده و دچار شکست می‌شوند. طبیعت تصادفی این سیستم‌ها به دلیل خرابی احتمالی ماشین‌ها و مدت زمان تعمیر متغیر می‌باشد که چهار وضعیت در حال عملیات، توقف به دلیل خرابی ماشین، فقدان مواد اولیه و اشباع انبار محصول تولید شده را برای ماشین شکل می‌دهد [۳، ص ۲۶].



۲-۴- سیاست کنترلی

ملاحظات مربوط به برنامه ریزی تولید و نگهداری تعمیرات اصلاحی در سیستم‌های ساخت و تولید با استفاده از تئوری کنترل بهینه انجام می‌شود. برای کنترل سرعت جریان قطعات و کنترل تولید در یک سیستم با توجه به خرابی‌های تصادفی و تعمیرات، کمیا و گرشوین [۲۲]، ص ۳۵۳] و آکلا و کومار [۲۳، ص ۱۱۶] یک سیاست نقطه محدودکننده را معرفی کردند. سیاست کنترلی تولید/ موجودی که بر مبنای سیاست نقطه محدودکننده است، شامل تولید و نگهداری ذخیره اطمینان محصول نهایی با توجه به ارضای تقاضا و جلوگیری از کمبود در طول عملیات تعمیر است [۲۴، ص ۶۴۴]. در سیستم‌های پیچیده که امکان حل تحلیلی وجود ندارد می‌توان از سیاست نقطه محدودکننده - که در اجرا بسیار ساده و قابل درک است - برای کمینه کردن تابع هدف مسئله استفاده کرد.

$$u_{i \neq n}(t) = \begin{cases} \cdot & x_i(t) > Z_i^* \\ u_i^{max} & x_i(t) + u_i^{max} < Z_i^* \\ [Z_i - x_i(t)] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

$$u_{i=m}(t) = \begin{cases} \cdot & x_i(t) - d > Z_i^* \\ u_i^{max} & x_i(t) + u_i^{max} - d < Z_i^* \\ [Z_i - (x_i(t) - d)] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

نرخ تولید هر ماشین وابسته به Z_i^* است که به عنوان سطح آستانه موجودی هر انبار است [۲۵، ص ۱۱۹].

۵- سؤال‌های اصلی تحقیق

- ۱- چگونه می‌توان یک مدل شبیه‌سازی شده برای سیستم‌های شبکه‌ای غیرقطعی با در نظر گرفتن کالاهای غیر پایدار (فساد پذیر) ارائه کرد؟
- ۲- نرخ بهینه تولید و کمبود در هر لحظه از زمان در این‌گونه سیستم‌ها چه میزان باشد تا مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری و کمبود حداقل شود؟

۶- روش تحقیق

در این پژوهش یک متغیر مستقل و یک متغیر وابسته در نظر گرفته شده است. متغیر Z^* ، یک متغیر مستقل و نرخ تولید از نوع متغیر وابسته می‌باشد و براساس سیاست کنترلی، تغییرات آن وابسته به متغیر مستقل Z^* است. همچنین الگوریتمی مبنی بر مدل‌های کنترل تولید و موجودی‌ها ارائه و در آن Z^* تعیین شده و ارزیابی جواب بهینه صورت می‌گیرد. میزان پیچیدگی حل تحلیلی این‌گونه مسائل، امکان استفاده از شبیه‌سازی را فراهم می‌کند. روند انجام این مطالعه به صورت شکل ۲ است.



شکل ۲ الگوی روند انجام پژوهش

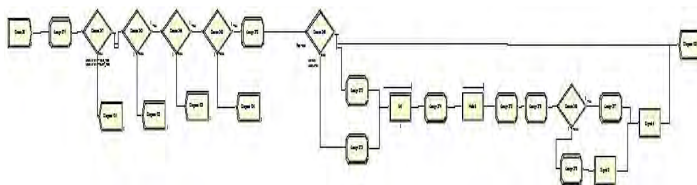
در ادامه به توضیح مدل شبیه‌سازی با در نظر گرفتن محدودیت‌ها، و تابع هدف مسئله پرداخته می‌شود. همچنین از مثال عددی برای تعیین صحت مدل بهره گرفته شده است. **مدلسازی شبیه‌سازی سیستم‌های شبکه‌ای مستعد شکست.** شانون شبیه‌سازی را فرایند طراحی یک مدل از سیستم واقعی و انجام آزمایش‌ها با این مدل، به منظور فهمیدن رفتار سیستم و یا ارزیابی استراتژی‌های مختلف برای عملیات سیستم معرفی کرده است [۱، ص ۲۱۲]. شبیه‌سازی گسسته پیشامد با کامپیوتر و یا به‌طور خلاصه شبیه‌سازی کامپیوتری، خصوصیتی دارد که آن را از دید تحلیلگران به ابزار جالبی تبدیل کرده است [۲۶، ص ۱۵].



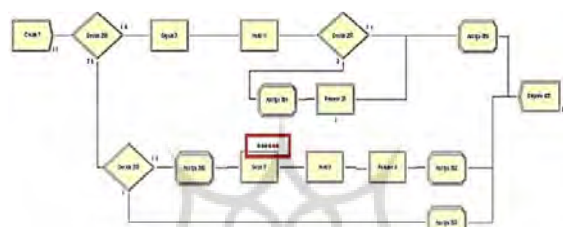
سیستم مورد مطالعه در این پژوهش شامل چهار ماشین است. هر ماشین محصولی مجزا تولید می‌کند که این محصولات با ضریبی معین در تولید محصول ماشین‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به منظور شبیه‌سازی این سیستم از نرم‌افزار ARENA ۱۴,۰ که در ۳ تکرار و هر تکرار ۹۶۰ دقیقه زمان طی می‌کند، استفاده شده است. به این منظور نخست متغیرهای اولیه اعم از متغیرهای تصمیم (Z_i)، ماکزیمم نرخ تولید هر ماشین μ_{max} ، هزینه نگهداری به ازای هر واحد کالا (h_i)، هزینه کمبود به ازای هر واحد کالا در واحد زمان π_i و غیره تعیین می‌شوند. قطعات با نرخ $\frac{1}{\mu_{max}}$ تولید می‌شود.

قطعات با فاصله زمانی تعریف شده داخل سیستم شده و مورد استفاده ماشین مربوط قرار می‌گیرد. سپس خرابی ماشین بررسی می‌شود. در صورت سالم بودن ماشین روند تولید ادامه پیدا می‌کند. در ماشین‌های میانی میزان کالاهای مرحله قبل که برای تولید محصول مرحله جاری مورد نیاز است، بررسی می‌شود. در صورتی که $X_i > Z_i$ باشد، نباید محصولی تولید شود. اگر $X_i < Z_i$ باشد، باید با حداکثر نرخ تولید، تولید محصول را ادامه داد. در غیر این صورت با نرخ $Z_i - X_i$ تولید صورت می‌گیرد. سپس وارد فرایند تولید می‌شود و تولید انجام می‌گیرد. در مرحله چهارم از تولید اگر کالا تا زمان مورد نظر مصرف نشود جزء کالاهای فاسد شده در نظر گرفته شده و دیگر قابل استفاده نخواهد بود. فساد کالا تنها در انبار محصول نهایی مجاز در نظر گرفته شده است.

مدل شبیه‌سازی تقاضا و کمبود به مدل شبیه‌سازی تولید ماشین چهارم مرتبط است. در این مدل مشتریان با نرخ λ/d وارد سیستم می‌شوند. در این زمان سیگنالی از قسمت تقاضا به قسمت تولید فرستاده شده و یک واحد کالا آزاد می‌شود. کالای آزاد شده مورد بررسی قرار می‌گیرند. اگر کالای تولید شده سالم باشد، به مشتری تحویل داده می‌شود و مشتری سیستم را ترک می‌کند. در مدل حاضر، این نکته حایز اهمیت است که مشتریانی که کالای فاسد شده دریافت می‌کنند، به منظور تعویض کالای فاسد و دریافت کالای سالم در اولویت صف مشتریانی قرار می‌گیرند که با کمبود کالا در سیستم مواجه شده‌اند. شکل‌های ۳ و ۴ مدل شبیه‌سازی تولید محصول نهایی و مدل شبیه‌سازی مربوط به تقاضا و کمبود را نشان می‌دهند.



شکل ۳ شبیه‌سازی سیستم مستعد شکست (مرحله نهایی تولید)



◆ مشتریانی که کالای فاسد دریافت کرده‌اند
◆ کمبود پس‌افت
شکل ۴ مدل شبیه‌سازی تقاضا و کمبود

۷- تجزیه و تحلیل داده‌ها

به عنوان شبیه‌سازی سیستم مفروض، متغیرهای اولیه از جمله حداکثر نرخ تولید، حداکثر ظرفیت انبار، هزینه کمبود و نگهداری، ضریب مصرف، نرخ تقاضا و غیره مقداره‌ی می‌شوند. مقادیر نرخ تولید هر ماشین به صورت زیر است:

$$Mpr_1 = 51, Mpr_2 = 19, Mpr_3 = 9, Mpr_4 = 8$$

همچنین مقادیر ضریب مصرف کالای i که در تولید محصول j به کار می‌رود، به صورت زیر است:

$$l_{12} = 1, l_{13} = 2, l_{14} = 2, l_{24} = 1, l_{33} = 2, l_{44} = 1$$

فاکتور یا متغیر تصمیم که به صورت Z_i تعریف شده است به ترتیب زیر مقداره‌ی می‌شود:

$$Z_1 = 100, Z_2 = 65, Z_3 = 12, Z_4 = 7$$

تقاضای محصول نهایی $d=6$ واحد در نظر گرفته شده است.

سیاست کنترلی نیز براساس فرمول‌های (۲۰) و (۲۱) تعریف شده است. همچنین X_i که به



عنوان سطح موجودی در زمان t تعریف شده است، به صورت زیر مقداردهی شده است:
 $X_1 = 100, X_2 = 60, X_3 = 12, X_4 = 0$
 زمان فساد کالا در این مدل ۳ ساعت فرض شده است و اگر کالای تولید شده در مرحله
 نهایی تا این زمان مصرف نشود، جزء کالاهای فاسد محسوب می‌شود. هزینه نگهداری در واحد
 زمان به صورت است:

$$h_1 = 1, h_2 = 2, h_3 = 6, h_4 = 10$$

در نهایت هزینه کمبود پس افت به ازای هر واحد کمبود کالای نهایی در زمان t ، ۳۰
 واحد پولی و هزینه فساد به ازای هر واحد کالای نهایی فاسد شده در زمان t ، ۲۷
 واحد پولی در نظر گرفته شده است. میانگین هزینه کل براساس فرمول (۱۳) حساب
 می‌شود. به منظور میانگین مدت زمان بین شکست (خرابی) ماشین‌آلات از توزیع
 نمایی با پارامترهای $\mu_1 = 30, \mu_2 = 40, \mu_3 = 45, \mu_4 = 40$ و $\mu_5 = 40$ (واحد زمان) و
 متوسط زمان تعمیر $\lambda_1 = 5, \lambda_2 = 10, \lambda_3 = 25$ و $\lambda_4 = 25$ (واحد زمان) استفاده
 شده است.

۱-۷- روش تاگوچی

بهینه‌سازی تاگوچی یکی از روش‌های بهینه‌سازی آزمایشی است که از آرایه آرتوگونال
 استاندارد برای تشکیل ماتریس آزمایش استفاده می‌کند. این ماتریس به ما کمک خواهد کرد که
 بیشترین اطلاعات را از حداقل تعداد آزمایش‌ها استخراج و همچنین بهترین سطح پارامتر را پیدا
 کنیم. در تحلیل داده، نرخ S/N برای محاسبه پاسخ به‌کار گرفته می‌شود [۲۷، ص ۷۹].
 سه نوع خصوصیت عملکردی برای تحلیل نرخ S/N وجود دارد: کمترین-بهترین، میانگین-
 بهترین، بیشترین-بهترین. هدف از این مطالعه کمینه کردن میانگین هزینه کل است. بنابراین از
 ویژگی کمترین-بهترین طبق فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$\eta = S/N_s = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (21)$$

که y_i تعداد داده‌های مشاهده شده در آزمون آزمایش و n تعداد آزمایش‌ها است [۲۸، ص
 ۲۱۵۱].

۲-۷- تعیین تعداد تکرارها^۲ و اجرای شبیه‌سازی

تعیین تعداد تکرارها و مدت زمان اجرای مناسب به منظور انجام تجزیه و تحلیل بر خروجی‌های مدل، امری ضروری است. به منظور تعیین تعداد تکرارهای شبیه‌سازی از شاخص ضریب تغییرات استفاده می‌شود که نسبت انحراف معیار به میانگین داده‌ها را نشان می‌دهد. براساس فرمول (۲۲)، ضریب تغییرات محاسبه می‌شود:

$$C.V = \frac{\sigma}{\mu} \quad (22)$$

از برآوردکننده زیر به منظور برآورد ضریب تغییرات استفاده می‌کنیم.

$$C.V = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}}{\sum_{i=1}^n x_i / n} \quad (23)$$

در این رابطه، x_i نشان‌دهنده میانگین هزینه کل سیستم در واحد زمان در هر بار شبیه‌سازی سیستم است. n نشان‌دهنده تعداد اجراهاست. برآورد فاصله‌ای برای هزینه سیستم عبارت است از:

$$\bar{X} \pm t_{\alpha; n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (24)$$

با افزایش n ، برآورد فاصله‌ای کوتاه‌تر شده و به سمت برآورد نقطه‌ای میل می‌کند. در صورتی که بخواهیم طول برآورد فاصله‌ای از یک مقدار مشخص مانند l کمتر شود، تعداد اجراهای شبیه‌سازی تعیین می‌شود. به این منظور، روابط زیر انجام می‌گیرد:

$$2t_{\alpha; n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq l \quad (25)$$

با تقسیم طرفین رابطه (۲۵) بر \bar{X} ، طول برآورد فاصله‌ای l به نسبت میانگین داده‌ها سنجش می‌شود.

$$2t_{\alpha; n-1} \frac{s}{\bar{x} \sqrt{n}} \leq \frac{l}{\bar{x}} \quad (26)$$

اگر $\frac{l}{\bar{x}} = L$ باشد، خواهیم داشت:

$$n \geq \left[2t_{\alpha; n-1} \frac{C.V}{L} \right]^2 \quad (26)$$

بنابراین، مقدار n باید به گونه‌ای انتخاب شود که رابطه (۲۶) برقرار باشد [۳، ص ۵۸].



به منظور تعیین تعداد تکرارهای هر سناریو، براساس روابط (۲۲) تا (۲۶) - در صورتی که فاصله اطمینان نسبی ۲۳ درصد مدنظر باشد - با احتمال ارتکاب خطای نوع اول، یعنی $\alpha = 0.05$ ، حداقل تکرارهای مورد نیاز ۳ می باشد؛ به این معنا که هر سناریو، ۳ بار تکرار می شود. در این مثال با توجه به تعداد تکرارها، برآورد ضریب تغییرات حدود ۶ درصد است.

۳-۷- طراحی آزمایش تاگوچی

به منظور محاسبه آزمایش تاگوچی، چهار فاکتور در سه سطح در نظر گرفته شده است. در این مسئله، شعاع همسایگی برای سطح آستانه انبار $[Z_i \pm 1]$ در نظر گرفته می شود. علت این امر آن است که متغیرهای تصمیم در این فاصله معنادار هستند. در این پژوهش با تحلیل حساسیت بر شعاع همسایگی، ناحیه کاوش به صورتی که ذکر شد، انتخاب شده است. با تعیین یک پاسخ اولیه، وضعیت جاری سیستم مشخص می شود. در این پژوهش با استفاده از آزمون تاگوچی به دنبال جواب بهتر حول جواب فعلی هستیم. فاکتورها و سطوح مربوط به هریک در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای سطح آستانه موجودی و سطوح آنها

	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
سطح ۱	۹۹	۶۴	۱۱	۶
سطح ۲	۱۰۰	۶۵	۱۲	۷
سطح ۳	۱۰۱	۶۶	۱۳	۸

در این آزمایش تعداد فاکتور برابر ۴ و تعداد سطوح برابر ۳ است. آرایه اورتوگونال استاندارد در دسترس L_{27} و L_9 است. با توجه به مفهوم تاگوچی، آرایه اورتوگونال L_9 برای این مطالعه انتخاب می شود. ساختار این آرایه در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ چیدمان آزمایش با استفاده از آرایه اورتوگونال L۹

شماره آزمایش	پارامترهای سطح آستانه موجودی			
	Z _۱	Z _۲	Z _۳	Z _۴
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳
۴	۲	۱	۲	۳
۵	۲	۲	۳	۱
۶	۲	۳	۱	۲
۷	۳	۱	۳	۲
۸	۳	۲	۱	۳
۹	۳	۳	۲	۱

هر آزمایش با توجه به آرایه اورتوگونال L۹ انجام شده است. همچنین مقادیر بهینه با استفاده از نرخ S/N تعیین می‌شود. جدول ۳ نتایج آزمایش را برای آستانه موجودی و نرخ S/N نشان می‌دهد.

جدول ۳ نتایج آزمایش و نرخ S/N

شماره آزمایش	پارامترهای سطح آستانه موجودی				میانگین هزینه کل	نرخ (S/N)
	Z _۱	Z _۲	Z _۳	Z _۴		
۱	۹۹	۶۴	۱۱	۶	۶۱۲/۸۷	-۵۵/۷۴۷۴
۲	۹۹	۶۵	۱۲	۷	۶۲۰/۰۹	-۵۵/۸۴۹۱
۳	۹۹	۶۶	۱۳	۸	۶۲۵/۲۴	-۵۵/۹۲۰۹
۴	۱۰۰	۶۴	۱۲	۸	۶۱۸/۴۷	-۵۵/۸۲۶۴
۵	۱۰۰	۶۵	۱۳	۶	۶۲۵/۶۶	-۵۵/۹۲۶۸
۶	۱۰۰	۶۶	۱۱	۷	۶۱۷/۰۷	-۵۵/۸۰۶۷
۷	۱۰۱	۶۴	۱۳	۷	۶۲۴/۰۳	-۵۵/۹۰۴۱
۸	۱۰۱	۶۴	۱۱	۸	۶۱۷/۳۷	-۵۵/۸۱۰۹
۹	۱۰۱	۶۶	۱۲	۶	۶۲۲/۵۶۵۶	-۵۵/۸۸۳۶



از نرخ S/N جدول ۳ می توان بهترین ترکیب بندی فاکتورها برای میانگین هزینه کل را با استفاده از بالاترین مقدار سطوح تعیین کرد. بنابراین بهترین ترکیب بندی برای این مسئله به صورت Z_{11} (Z_1 در سطح ۱)، Z_{31} (Z_3 در سطح ۱)، Z_{31} (Z_3 در سطح ۱) و Z_{41} (Z_4 در سطح ۱) می باشد. با توجه به جواب بهینه به دست آمده در مثال عددی این پژوهش، براساس معادلات (۱۹) و (۲۰)، سیاست کنترلی (نرخ بهینه تولید) برای ماشین های میانی و ماشین نهایی به صورت زیر مطرح می شود:

$$u_{i=1}(t) = \begin{cases} 0 & x_1(t) > 100 \\ 51 & x_1(t) + 51 < 100 \\ [100 - x_1(t)] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

$$u_{i=2}(t) = \begin{cases} 0 & x_2(t) > 65 \\ 19 & x_2(t) + 19 < 65 \\ [65 - x_2(t)] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

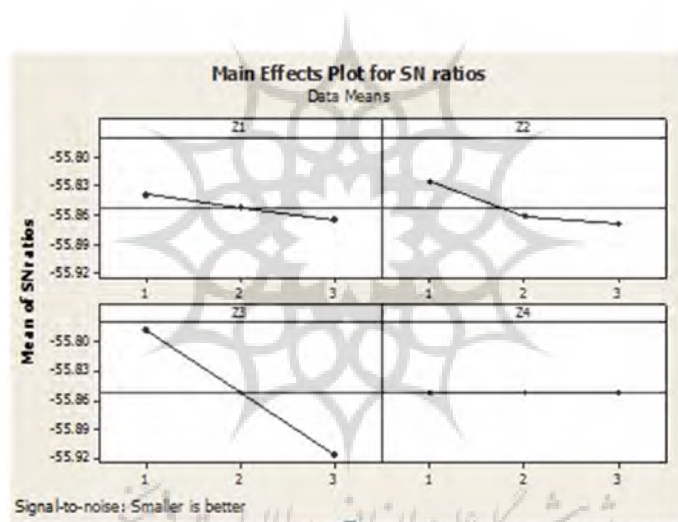
$$u_{i=3}(t) = \begin{cases} 0 & x_3(t) > 12 \\ 9 & x_3(t) + 9 < 12 \\ [12 - x_3(t)] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

$$u_{i=4}(t) = \begin{cases} 0 & x_4(t) - 6 > 7 \\ 8 & x_4(t) + 8 - 6 < 7 \\ [7 - (x_4(t) - 6)] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (30)$$

در روش تاگوچی تمامی مقادیر نرخ S/N بر مبنای مفهوم بیشترین-بهترین انجام شده است. شکل ۵ نشان می دهد که فاکتور ۳ بیشترین شیب را دارد. به همین دلیل بر کاهش هزینه نیز بیشترین تأثیر را خواهد داشت. همچنین جدول پاسخ برای نرخ S/N و نتایج آن اهمیت هر فاکتور در کاهش هزینه را نشان می دهد. همان طور که در جدول ۴ مشخص است، فاکتور ۳ رتبه اول است و بیشترین اهمیت را در کاهش هزینه می تواند داشته باشد.

جدول ۴ جدول پاسخ برای نرخ S/N کمترین - بهترین

سطح	Z _۱	Z _۲	Z _۳	Z _۴
۱	-۵۵/۸۴	-۵۵/۸۳	-۵۵/۷۹	-۵۵/۸۵
۲	-۵۵/۸۵	-۵۵/۸۶	-۵۵/۸۵	-۵۵/۸۵
۳	-۵۵/۸۷	-۵۵/۸۷	-۵۵/۹۲	-۵۵/۸۶
دلتا	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۰
رتبه بندی	۳	۲	۱	۴



شکل ۵ نمودار تأثیر برای نرخ‌های S/N

۴-۷- تحلیل واریانس

در این قسمت تأثیر هر یک از فاکتورها بر کاهش هزینه با استفاده از تحلیل واریانس مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای انجام تحلیل واریانس و محاسبه مجموع مربعات از فرمول‌های زیر استفاده می‌شود [۲۸، ص ۸۳].



$$SS = \frac{1}{\nu} \left\{ \left(\sum \frac{S}{N} \text{ ratio level I} \right)^2 + \left(\sum \frac{S}{N} \text{ ratio level II} \right)^2 + \left(\sum \frac{S}{N} \text{ ratio level III} \right)^2 - C.F \right\} \quad (31)$$

$$\text{Correction Factor (C.F)} = \frac{\left(\sum \frac{S}{N} \right)^2}{N} \quad (32)$$

که N، تعداد کل آزمایش‌ها می‌باشد. در این مسئله (N=9) است.

همچنین، درجه آزادی^۲ و واریانس به ترتیب از فرمولهای (۳۳) و (۳۴)، به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\text{Degree of freedom} = \text{Level} - 1 \quad (33)$$

$$\text{Variance} = \frac{SS}{DOF} \quad (34)$$

نتایج تحلیل واریانس در جدول ۵ نشان داده شده است. براساس جدول ۵ فاکتور Z_3 بیشترین تأثیر را در کاهش هزینه دارد.

جدول ۵ تحلیل واریانس

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	میزان تأثیرات
Z_1	۲	۰/۰۴۷	۰/۰۲۳۵	۰/۰۷۲
Z_2	۲	۰/۰۸۶	۰/۰۴۳	۰/۱۳۱
Z_3	۲	۰/۵۲	۰/۲۶	۰/۷۹۷
Z_4	۲	۰/۰۰۰	.	.
خطا
کل	۸	۰/۶۵۳	.	۱۰۰

۷-۵- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت روشی برای پیش‌بینی تغییرات در خروجی‌های مدل با اعمال تغییرات در ورودی‌ها است. در این پژوهش، تحلیل حساسیت روی زمان فساد کالا و نرخ خرابی ماشین‌آلات انجام می‌گیرد.

۶-۷- تحلیل حساسیت روی زمان فساد کالا

در این پژوهش چنانچه محصول نهایی در انبار طی مدت زمان مشخصی مورد استفاده قرار نگیرد، فاسد و غیر قابل استفاده می‌شود. هزینه فساد به ازای هر واحد ثابت است، اما نرخ فساد وابسته به زمان است. به منظور تحلیل حساسیت روی این پارامتر، زمان فساد کالا یک واحد زمان افزایش و یک واحد زمان کاهش داده می‌شود و نتایج به صورت زیر به دست می‌آید. در جدول ۶ به بررسی اثر این مدت زمان بر میانگین هزینه‌های سیستم پرداخته شده است.

جدول ۶ تحلیل حساسیت نسبت به مدت زمان فساد کالا

تغییرات زمان فساد کالا	مدت زمان فساد کالا بر حسب واحد زمان	میانگین هزینه کل	میانگین هزینه نگهداری	میانگین هزینه کمبود	میانگین هزینه کالای فاسد شده
یک واحد زمان کاهش	۲	۶۳۴/۵۵۴۲	۲۴۵/۳۵۲	۸۹/۲۷۲۱	۲۹۹/۹۳۰۱
مدل اصلی	۳	۶۱۲/۸۷	۲۷۰/۷۸	۷۸/۰۵۴۹	۲۶۴/۰۳۵۱
یک واحد زمان افزایش	۴	۵۷۷/۳۲۱۶	۳۰۴/۷۵۶۸	۶۰/۱۲۷	۲۱۲/۴۳۷۸

با توجه به جدول و مقایسه نتایج با سناریو بهینه مدل اصلی، افزایش مدت زمان فساد کالا، هزینه نگهداری کالا در انبار را افزایش می‌دهد، اما منجر به کاهش هزینه‌های کمبود و کالای فاسد شده خواهد شد.

۷-۷- تحلیل حساسیت روی پارامتر توزیع خرابی ماشین‌آلات

در این پژوهش خرابی ماشین‌آلات تصادفی و به صورت نمایی تعریف شده است. همچنین فرض بر این است که خرابی ماشین‌آلات به سوابق تعمیر و خرابی ماشین بستگی ندارد. به منظور بررسی اثر پارامتر توزیع نمایی بر میانگین هزینه‌های سیستم، براساس جدول ۷، مقادیر مختلفی برای میانگین زمان بین دو خرابی هر ماشین آزمون شده است.



جدول ۷ تحلیل حساسیت نسبت پارامتر توزیع خرابی ماشین آلات

میانگین هزینه کالای فاسد شده	میانگین هزینه کمیود	میانگین هزینه نگهداری	میانگین هزینه کل	میزان تغییر پارامتر توزیع نمایی
۲۱۵/۸۵۲۵	۹۵/۳۷۵۸	۲۲۷/۸۳۵۴	۵۳۹/۰۶۳۷	۵۰٪ کاهش
۲۹۹/۰۸۶۳	۵۳/۶۷۲۴	۲۹۸/۶۷۱	۶۵۱/۴۲۹۷	۵۰٪ افزایش

کاهش زمان بین خرابی‌ها و در نتیجه استفاده از موجودی انبار در زمان توقف ماشین، مدت زمان نگهداری کالا در انبار و در نتیجه احتمال فاسد شدن کالا را کاهش می‌دهد. موجودی انبار در صورت وجود، صرف برآورده کردن تقاضا می‌شود و به تبع آن هزینه نگهداری کالا در انبار نیز کاهش پیدا خواهد کرد. افزایش تعداد دفعات شکست ماشین آلات، احتمال مواجه شدن با کمیود را افزایش می‌دهد. بنابراین هزینه کمیود نیز افزایش پیدا می‌کند.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور تعیین نرخ بهینه تولید، از رویکرد بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی استفاده شد. سیستم مورد مطالعه یک سیستم شبکه‌ای مستعد شکست متشکل از n ماشین بوده که فرض خرابی و شکست ماشین آلات به آن وارد شده است. هدف از انجام این پژوهش، کمینه کردن مجموع هزینه‌های تولید، کمیود، نگهداری و فساد کالا در یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت است. از سیاست کنترلی (HPP) برای تعیین نرخ بهینه تولید، بهره گرفته شده است. براساس سیاست کنترلی، نرخ بهینه تولید وابسته به میزان سطح بهینه موجودی انبار (Z_i) است. به دلیل پیچیدگی و قطعیت نداشتن سیستم‌های مستعد شکست و دشوار بودن تحلیل این‌گونه سیستم‌ها، مدلسازی شبیه‌سازی سیستم مفروض انجام شده است. سپس با استفاده از طراحی آزمایشات تاگوچی به تعیین بهینه سطح موجودی انبارها و به تبع آن تعیین نرخ بهینه تولید در راستای کمینه کردن میانگین هزینه کل بهره گرفته شده است.

به منظور پیاده‌سازی آزمایش تاگوچی با استفاده از نرم‌افزار Minitab، چهار فاکتور Z_1, Z_2, Z_3 و Z_4 و هر فاکتور در سه سطح در نظر گرفته شده است که آزمایش تاگوچی با آرایه اورتوگونال L_9 را در به دنبال دارد. بر این اساس مقادیر سطوح چهار فاکتور فوق مذکور برای

محاسبه Z_i ها در ۹ آزمایش اجرا شده و با استفاده از مقادیر Z_i ها، محاسبه میانگین هزینه کل انجام شده است. همچنین مقادیر نرخ S/N برای میانگین هزینه کل محاسبه شده است. از نرخ S/N می‌توان بهترین ترکیب‌بندی فاکتورها برای میانگین هزینه کل را با استفاده از بالاترین مقدار سطوح تعیین کرد. بنابراین بهترین ترکیب بندی برای این مسئله به صورت Z_{11} (Z_1 در سطح ۱)، Z_{21} (Z_2 در سطح ۱)، Z_{31} (Z_3 در سطح ۱) و Z_{41} (Z_4 در سطح ۱) می‌باشد که هدف پژوهش را به درستی برآورده می‌کند. با توجه به مقادیر S/N هر فاکتور می‌توان دریافت که فاکتور سوم، یعنی سطح موجودی انبار سوم (Z_3) بیشترین تأثیر را در کاهش هزینه دارد که البته نتایج حاصل از تحلیل واریانس که به منظور تعیین اهمیت هر فاکتور مطرح شد، گویای این مطلب است. در ادامه مطلب فوق، تحلیل حساسیت بر دو پارامتر زمان فساد کالا و نرخ خرابی ماشین‌آلات انجام شده است که نشان می‌دهد با افزایش زمان فساد کالا، هزینه نگهداری افزایش و هزینه کمبود و فساد کالا کاهش پیدا می‌کند. همچنین، نرخ افزایش خرابی ماشین‌آلات، موجب افزایش میانگین هزینه فساد کالا و هزینه نگهداری کالا در انبار می‌شود و میانگین هزینه کمبود کاهش می‌یابد.

با مطالعه و بررسی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان دریافت که هدف بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌های مرتبط با موضوع پژوهش حاضر، تعیین نرخ بهینه تولید بوده، درحالی که تاکنون چنین مطالعه‌ای با هدف تعیین نرخ بهینه تولید به منظور کاهش میانگین هزینه کل، با فرض وجود کالاهای غیرپایدار در سیستم‌های شبکه‌ای مستعد شکست و به تبع آن کاهش هزینه‌های کلی سیستم با استفاده از شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌های تاگوچی انجام نشده است. همچنین در پژوهش‌های صورت گرفته فرض‌های فسادپذیری کالاها، کمبود از نوع فروش از دست رفته و پس‌افت، خرابی ماشین‌آلات، وجود سیستم‌های شبکه‌ای مستعد شکست و وجود محدودیت‌هایی از قبیل محدودیت ظرفیت انبار به‌طور توأم وجود ندارد. همین امر وجه تمایز این پژوهش با پژوهش‌های قبلی است که می‌توان نوآوری این پژوهش را در موارد فوق پیدا کرد.

از جمله محدودیت‌های انجام این پژوهش، به‌کار نگرفتن مطالعه موردی و در دست نداشتن اطلاعات حقیقی است. همچنین بهینه‌سازی با آزمایش‌های تاگوچی نیز یکی از محدودیت‌های مسئله می‌تواند تعریف شود.



با توجه به اینکه بیشتر صنایع تولیدی در جهان واقعیت سیستم‌های پیچیده تولید دارند، در نتیجه نتایج این پژوهش می‌تواند الگوی مناسبی برای مدیران صنعت به منظور کنترل تولید و هزینه‌های مربوط به آنها باشد. همچنین این مدل می‌تواند با در نظر گرفتن فرضیه‌هایی از قبیل وجود تقاضای احتمالی، نرخ معین فساد کالا، محدودیت میزان سفارش‌دهی مواد اولیه، در نظر گرفتن هزینه‌های راه‌اندازی ماشین‌ها و غیره با هدف حداکثر کردن سود و کاهش هزینه‌های کلی ارائه شود. همچنین اگر نیل به جواب بهینه قطعی حول جواب فعلی مدنظر باشد، بهینه‌سازی با الگوریتم‌های فرا ابتکاری از دیگر پیشنهادهایی است که می‌تواند در تحقیقات آینده مورد استفاده قرار گیرد.

۹- پی‌نوشت‌ها

1. Signal- to- Noise
2. Replication
3. Degree of Freedom (DOF)

۱۰- منابع

- [1] Momeni, M., Zareei, B., Esmailian, M., (2004), "Analyzing the performance of a production system using simulation model", *Management Research in Iran (Scientific Research Quarterly)*, Vol. 10, No. 4, pp. 211-230.
- [2] Saidi-Mehrabad, M., Paydar, M.M., Aalaei, A., (2013), "Production planning and worker training in dynamic manufacturing systems", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 32, No. 2, pp. 308– 314.
- [3] Sajadi, S.M., (2011), *Determination of production rate of network failure-prone manufacturing systems with constant demand*, PhD dissertation, Amirkabir University, Dept. of Industrial Engineering, pp. 1-100.
- [4] Haj Shir Mohammadi, A., (2005), *Principles of production and inventory planning and control*, Arkan Danesh Publications, Esfahan, Iran, pp. 1-472.
- [5] Pochet Y., Wolsey L.A., (2006), *Production planning by mixed integer*

- programming*. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc, ISBN 978-0387299594, pp. 1-499.
- [6] Kenne, J.P., Gharbi, A., Beit, M., (2007), "Age-dependent production planning and maintenance strategies in unreliable manufacturing systems with lost sale", *Eur J Oper Res*, Vol. 178, No. 2, pp. 408 – 420.
- [7] Kenne, J.P., Gharbi, A., (2004), "A simulation optimization based control policy for failure-prone one-machine, two product manufacturing systems", *Computers & Industrial Engineering*, Vol.46, No. 2, pp. 285–292.
- [8] Chan, F.T.S., Wang, Z., Zhang, J., (2007), "A two-level hedging point policy for controlling a manufacturing system with time-delay, demand uncertainty and extra capacity". *European Journal of Operational Research*, Vol. 176, No. 3, pp. 1528-1558.
- [9] Berthaut, F., Gharbi, A., Kenne, J.P., Boulet, J.F., (2010), "Improved joint preventive maintenance and hedging point policy", *Int. J. Production Economic*, Vol. 127, No. 1, pp. 60–72.
- [10] Sajadi, S.M., Seyed Esfahani, M. M. So"rensen, K., (2011), "Production control in a failure-prone manufacturing network using discrete event simulation and automated response surface methodology", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 53, pp. 35–46.
- [11] Dehayem, F. I., Nodem, F. I., Kenne, J. P., Gharbi, A., (2011), "Simultaneous control of production, repair / replacement and preventive maintenance of deteriorating manufacturing systems", *Int. J. Production Economics*, Vol. 134, No. 1, pp. 271–282.
- [12] Hajji, A., Mhada, F., Gharbi, A., Pellerin, R., Malhame, R., (2011), "Integrated product specifications and productivity decision making in unreliable manufacturing systems". *Int. J. Production Economics*, Vol. 129, No. 1, pp. 32–42.
- [13] Dhoubi, K., Gharbi, A., BenAziza, M. N., (2012), "Joint optimal production



- control/preventive maintenance policy for imperfect process manufacturing cell", *Int. J. Production Economics*, Vol. 137, No.1, pp. 126–136.
- [14] Duan, Q. Liao, T.W, (2013), "A new age-based replenishment policy for supply chain inventory optimization of highly perishable products", *Int. J. Production Economics*, Vol. 145, No. 2, pp. 658–671.
- [15] Soleymani, R., (2011), *Determining optimum production rate and preventive maintenance parameters in failure-prone manufacturing systems with metaheuristic methods*, M.Sc. Thesis, Department of Industrial Engineering, Azad University, Najafabad Branch, pp. 1-108.
- [16] Bahrami, M., (2011), *Determining production rate in mono-product failure-prone manufacturing systems with perishable goods*, M.Sc. Thesis, Department of industrial engineering, Azad University, Najefabad Branch, pp. 1-79.
- [17] Farzam-Rad, M., (2011), *Proposing a multi-period, multi-product, multi objective productive model using simulation*, M.Sc. Thesis, Department of industrial engineering, Azad University, Najafabad branch, pp. 1-98.
- [18] Amelian, S. Sajjadi, S.M. Alinaghian, M., (2015), "Optimal production and preventive maintenance rate in a failure-prone manufacturing system using discrete event simulation", *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 483-496.
- [19] Mahdavi Mazdeh, M., Riahi Nazari. A., Talei-Zadeh, A., (2012), "Developing an inventory control model for perishable goods with backlog shortage and discount amount", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 47, No. 1, pp. 69-80.
- [20] Sajadi, S. Kh., Azimi, P., (2014), "Optimizing the number of bank equipment using simulated annealing algorithm", *Management Research in Iran (Scientific Research Quarterly)*, Vol. 10, No. 4, pp. 230-211.
- [21] Fatemi Ghomi, M., (2010), *Production planning and inventory control*, 7th ed. Tehran, Iran, pp. 1-534.
- [22] Kimemia, J.G., Gershwin, S.B., (1983), "An algorithm for the computer control

- of production in flexible manufacturing system", IIE Trans, Vol. 15, pp. 353–362.
- [23] Akella, R., Kumar, P.R.,(1986), "Optimal control of production rate in a failure prone manufacturing system", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 31, No. 2, pp. 116–126.
- [24] Berhaut, F., Gharbi, A., Dhouib, K., (2011), "Joint modified block replacement and production/inventory control policy for a failure-prone manufacturing cell", *Omega*, Vol. 39, No. 6, pp. 642–654.
- [25] Xie, X., (1989), "Optimal control in a failure-prone manufacturing system", *Automatic Control*, IEEE, Vol. 31, No. 2, pp. 116-126.
- [26] Banks, J. Carson, J. S., (1984), *Discrete-event system simulation*, Prentice-Hall INC, pp. 1-528.
- [27] Sivasakthivel, T., Murugesan, K., Thomas, H.R., (2014), "Optimization of operating parameters of ground source heat pump system for space heating and cooling by Taguchi method and utility concept", *Applied Energy*, Vol. 116, pp. 76–85.
- [28] Mandal, N., Doloi, B., Mondal, B., Das, R., (2011), "Optimization of flank wear using Zirconia Toughened Alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and regression analysis", *Measurement*, Vol. 44, No. 10, pp. 2149–2155.