مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۱-۳۸، شماره‌ی ۱، ص. ۲۷-۴۹، (پژوهشی)

Original Article

بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در سیستم تولیدی سه‌سطحی چندمحصولی با ماشین‌های چندمنظوره (مطالعه‌ی موردی: لوله و اتصالات، تک‌جدار و دوجدار)

علی فتاحی (دانشجوکارشناسی ارشد)
گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی ـ مهندسی، واحد علوم تحقیقات، تهران
سید مجتبی سجادی * (دانشیار)
گروه کسب و کار جدید، دانشکده کارآفرینی، دانشگاه تهران
سید احمد یزدیان (استادیار)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فنی ـ مهندسی، واحد علوم تحقیقات، تهران

برنامه‌ریزی تولید یکی از مهم‌ترین کارکردها در فرایند تولید و مدیریت عملیات است. در این مقاله، یک شرکت تولیدکننده‌ی چندمحصولی با چندین ماشین نامتجانس مورد بررسی قرار گرفته و ما از شبیه‌سازی برای حل زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی با ماشین‌های چندمنظوره همراه با پراکندگی جغرافیایی استفاده شده است، که در آن تولیدکنندگان و انبارها زیر مجموعه‌ی یک شرکت واحد تحت یک استراتژی همکاری در شرایط بحرانی در نظر گرفته شده‌اند. هدف اصلی مقاله، بهینه‌سازی هزینه‌های سیستم تولیدی با استفاده از شبیه‌سازی، به گونه‌یی که مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری، کمبود و خرید ماشین‌ها کمینه شود. برای حل این مسئله یک روش جدید بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی با ترکیب آپتکوست انجام شده است. نتایج مثال عددی نشان می‌دهد که سیاست‌های کنترلی و نوآوری‌های در نظر گرفته شده در جهت کاهش هزینه‌های سیستم تأثیر بسزایی داشته است.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی، زنجیره‌ی تأمین چندسطحی، بهینه‌سازی تولید، ماشین‌های چندمنظوره، عدم قطعیت.

fattahialifa@gmail.com
msajadi@ut.ac.ir
ahmad.yazdian@srbiau.ac.ir

۱. مقدمه

مدیریت سیستم‌های تولید نسبت به دهه‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است.[۱] امروزه با تغییر الگوی رقابت، تولید و خدمات، شرکت‌های مستقل با رقابت بین زنجیره‌های عرضه رو به رو هستند. سطوح تصمیم‌گیری در مدیریت زنجیره‌ی تأمین با سه سطح به صورت زیر است:

- سطح راهبردی: به تصمیماتی مرتبط است که تأثیر بلندمدت برکارخانه دارند. این سطح تصمیمات مربوط به تعداد ماشین‌آلات، سیاست‌های تعیین‌کننده‌ی سرعت نرخ تولید ماشین‌آلات، اولویت‌بندی کارخانه تأمین‌کننده‌ی محصولات مربوط به انبارهای استانی، ظرفیت انبارهای کارخانجات تولیدی و ظرفیت انبار مواد اولیه هر کارخانه است.
- سطح فنی: تصمیماتی را شامل می‌شود که به صورت فصلی یا به صورت سالانه روزآمد می‌شود. این سطح تصمیمات مرتبط با خرید و تولید، سیاست‌های موجودی و رویکردهای حمل و نقل است.
- سطح عملیاتی: شامل تصمیمات روزانه مانند پذیرش یا رد تقاضای خرده‌فروشان توسط کارخانه، تعیین سرعت نرخ تولید ماشین‌آلات، پذیرش یا رد تقاضای انبار توسط انبارهای دیگر و تعیین کارخانه تأمین‌کننده‌ی تقاضای انبار است. از این رو نوشتار حاضر بر هر سه سطح تصمیم‌گیری راهبردی، فنی و عملیاتی متمرکز است.

معمولاً یک شرکت شامل چند زیرمجموعه‌ی کوچک و متوسط است. بیشتر مشاغل کوچک و متوسط[۱] هنوز هم در برنامه‌ریزی سنتی عرضه، تولید و توزیع استفاده می‌شوند. یعنی هریک از این مشاغل کوچک و متوسط به طور مستقل برای فعالیت‌های خود برنامه‌ریزی می‌کنند، که این مورد، هزینه‌ی کل زنجیره‌ی تأمین را افزایش می‌دهد. «زنجیره‌ی تأمین» شامل کلیه فعالیت‌های مربوط به جریان کالاها و تبدیل مواد، از تهیه مواد اولیه گرفته تا تحویل محصولات نهایی به مصرف‌کننده است. برخی از شرکت‌ها سعی دارند با ادغام کلیه فرایندهای موجود در زنجیره، کنترل زنجیره‌های تأمین خود را به دست آورند (از تهیه‌ی مواد یا اجرای خدمات گرفته تا تحویل کالا و خدمات به مشتریان). از این رو، ساختار سازمانی یک شرکت

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۷/۱۹، اصلاحیه ۱۴۰۰/۵/۲۰، پذیرش ۱۴۰۰/۶/۲۴.
DOI:10.24200/J65.2021.55098.2082

باید بر هماهنگی فعالیت‌ها با هدف تأمین اهداف شرکت متمرکز شود.[۲] به عنوان مثال برخی از محققان[۳-۵] سه سطح زنجیره‌ی تأمین، همراه با چند تولیدکننده را در نظر گرفته‌اند. در زمان‌بندی ماشین‌های موازی نیز محققانی مانند، کراوچنگو و ورنر[۶] نشان دادند که در یک سیستم تولیدی از هر نوع ماشین تعدادی به صورت موازی موجود است. اگر تولیدکننده نیاز به تعداد ماشین‌آلات بیشتری داشته باشد، به این ترتیب ماشین‌های موازی می‌توانند با توجه به پارامترهایی مثل زمان پردازش، فاصله‌ی تحویل کالا (هزینه‌ی حمل و نقل تحویل کالا) و خالی بودن ظرفیت ماشین‌های موازی شعبه‌ی دیگر کارخانه برنامه‌ریزی شوند. کیم وگلاک[۱] ماشین‌های چندمنظوره را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که در واقع چند شغل خاص توسط یک نوع ماشین قابل پردازش است اگر چنین سازگاری ماشین‌آلات به ما دهند. در محیط ماشین‌های موازی چندمنظوره سوالی که مطرح می‌شود این است که کدام کار باید به چه ماشینی برای دست‌یابی به اهداف برنامه‌ریزی (زمان‌بندی) شده اختصاص داده شود.

در محیط تصادفی که ممکن است خرابی تصادفی ماشین اتفاق بیفتد یا تقاضای مشتری تصادفی باشد، با افزایش نرخ تولید، می‌توان یک ذخیره‌ی ایمنی اضافی ایجاد کرد که شرکت را در برابر اختلالات محافظت کند. در عین حال، نرخ تولید بیشتر ممکن است خرابی ماشین را ایجاد کند و در نتیجه به طور کلی اختلال ایجاد شود. به طور مثال، حاتمی و همکاران[۷]، با هدف کنترل میزان تولید و همچنین کمینه‌سازی هزینه‌های نگهداری، کمبود، کالاهای تلف شده و هزینه‌های تعمیر در افق بی نهایت، یک سیستم تولیدی مستعد خرابی را با محصولات فاسد شدنی همراه با شبکه‌یی از ماشین‌آلات را بر اساس نقطه هجین در نظر گرفته‌اند. این نمونه‌ها نشان می‌دهد که نرخ تولید قابل کنترل فرصتی برای برنامه ریزان تولید است تا هزینه را کاهش دهد، اما تغییرات در نرخ تولید باید با دقت برنامه‌ریزی شده و با الزامات تصمیم برنامه‌ریزی موجود هماهنگ شود.[۸] برای رسیدن به نرخ تولید مورد نظر، مدیران تولید می‌توانند به طور مستقیم سرعت پردازش ماشین را تنظیم کنند و اگر ماشین‌آلات اجازه چنین سازگاری را بدهند، مقدار ساعات کاری اختصاص داده شده به فرایند تولید را تغییر دهند. تنظیم نرخ تولید به دو صورت انعطاف‌ناپذیر و یا انعطاف‌پذیر قابل تنظیم است. در حالت انعطاف‌ناپذیر، نرخ تولید تنها می‌تواند در آغاز یک چرخه تولید تنظیم شود و باید تا زمانی که ماشین دوباره راه‌اندازی شود ثابت نگه داشته شود. در شرایط انعطاف‌پذیر، در مقابل، نرخ تولید نیز ممکن است تنظیم شود در حالی که تولید هنوز در حال پیشرفت است. مطالعات مختلف[۱، ۹ و ۱۰] نشان داده است که بسیاری از سیستم‌های تولیدی به مرور زمان در اثر بار و فشار ناشی از تولید خراب می‌شوند. میزان خرابی این سیستم‌ها به طور معمول به میزان تولید بستگی دارد. این بدان معناست که می‌توان با تنظیم میزان تولید، میزان خرابی تجهیزات را کنترل کرد. میکائیل و همکاران[۱۱] تأثیر تنظیم نرخ تولید را برای تعادل تولید و کاهش ریسک خرابی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های نگهداری و بیشینه‌سازی درآمد تولید بررسی کردند و با استفاده از فرمول فرایند تصمیم‌گیری مارکوف نشان دادند که تصمیمات مربوط به نرخ تولید تا ۵۰ درصد باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. از طرفی نرخ تولید متغیر، فروشندگان را قادر می‌سازد تا عدم قطعیت تقاضا را برآورده کرده و مالیک و کیم[۱۲] در مسئله‌ی خود، فضای ذخیره‌سازی و محدودیت بودجه را برای فروشنده و محدودیت سطح خدمات مشتری را برای خریدار در نظر گرفتند. یک مدل SC برای یافتن مقدار بهینه‌ی سفارش، نقطه‌ی تغییر مجدد سفارش، زمان سفارش، سرمایه‌گذاری برای کاهش هزینه‌ی راه‌اندازی و نرخ تولید با کمینه هزینه‌ی کل پیش‌بینی شده‌ی زنجیره در نظر گرفته‌اند. برای دست‌یابی به راه حل‌های بهینه برای متغیرهای تصمیم‌گیری، نویسندگان از یک روش بهینه‌سازی کلاسیک در مدل پیشنهادی استفاده کردند که باعث جلوگیری از انباشته شدن محصول و هزینه‌های نگهداری در فروشگاه شده است. این در حالی است که در اغلب مطالعات، برنامه‌ریزی تولید و کنترل ثابت فرض شده است. این امر بر عملکرد سیستم تولیدی تأثیر منفی خواهد داشت، چرا که ممکن است منجر به سطوح موجودی بالاتر یا هزینه‌ی تولید واحد بالاتر از حد لازم شود، یا به انتشار گازهای گلخانه‌یی غیر ضروری بینجامد و یا کیفیت محصول بهینه نباشد. علاوه بر این، تنظیم نرخ تولید بر تصمیم تعداد زیادی از ماشین‌ها نیز تأثیر می‌گذارد و چنانچه چندین ماشین موازی در دسترس باشد، برای تولید انتخاب می‌شوند. اگر شرکتی تصمیم گیرد که ماشین‌آلات را با نرخ تولید بالاتر راه‌اندازی کند، ممکن است نیاز به ماشین‌های کم‌تری برای تولید یک تقاضا داده شده داشته باشد، که ممکن است تأثیر مثبتی بر هزینه‌های کلی راه‌اندازی چرخه‌ی تولید داشته باشد.[۱] برنامه‌ریزی تولید باید تحت عدم اطمینان انجام شود و در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها، مدل واقعی برنامه‌ریزی تولید را منجر می‌شود. ثابت شده است که روش‌های بهینه‌سازی شبیه‌سازی، برای تجزیه و تحلیل تنظیمات مختلف سیستم یا روش‌های عملیاتی جایگزین برای سیستم‌های لجستیک یا ساخت پیچیده تحت عدم اطمینان مفید است.[۱۳] همچنین عدم قطعیت‌ها که باعث برهم زدن برنامه‌ریزی تولید می‌شود، شامل تولید اقلام معیوب ونرخ تقاضا متغیر است که در آثار مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند.[۱۱ و ۱۴] عوامل دیگری که باعث بالا رفتن تعداد خرابی محصولات تولیدی می‌شود عبارت‌اند از: سن دستگاه، نرخ تولید دستگاه، مواد اولیه‌ی بازیافتی (برای تولید محصولات با درجه‌ی کیفی پایین‌تر) و همچنین عدم اجرای تعمیرات دوره‌یی[۱۱] و پولتسکس و همکاران.[۱۵] در یک سیستم تولیدی چندمحصولی، معمولاً برای تولید هر نوع محصول نیاز به یک نوع ماده‌ی خام است، که انتخاب تأمین‌کننده و تعیین میزان بهینه‌ی سفارش یکی از اجزای مهم تولید و مدیریت لجستیک برای بسیاری از شرکت‌هاست. سیاست‌های کنترل موجودی در اکثر ادبیات به گونه‌یی تعیین شده است که باعث کاهش هزینه‌های نگهداری موجودی شود و مقدار بیشینه نیز به گونه‌یی تعیین شود که بیشینه موجودی تأمین شود تا هزینه‌های کل به کم‌ترین میزان خود برسد و این مقدار در هر دوره ثابت است.[۱۶ و ۱۷] همچنین برخی نویسندگان[۱۸]، مواجهه با کمبود را در سیستم مجاز فرض کرده‌اند. که این کمبود خود باعث برهم ریختن برنامه تولید و تحویل به موقع محصولات به متقاضیان می‌شود. از طرفی تعیین مقدار ثابت موجودی ماده‌ی خام در سیستم‌هایی که دارای عدم قطعیت تقاضا هستند و در واقع نرخ تقاضا در هر دوره متفاوت است باعث تحمیل هزینه‌های انبار داری و یا حتی هزینه‌های بالای کمبود به سیستم می‌شود. همچنین به دلیل تقاضای متغیر مشتریان در طول سال و محدودیت‌های تولید، تولیدکننده در زمان‌های افزایش تقاضا نیاز به یک مدیریت یکپارچه برای مدیریت موجودی انبارها و پاسخ لازم به مشتریان دارد.

پژوهشگران زیادی یک سیستم سه‌سطحی شامل یک یا چند تأمین‌کننده، یک تولیدکننده و چند خرده‌فروش را در نظر گرفته‌اند که، بازی غیرهمکاری بین اعضای خرده‌فروش برقرار است[۱۹-۲۲] و این در حالی است که این عدم همکاری باعث افزایش هزینه‌های کل سیستم می‌شود.

بنابراین هدف نوشتار حاضر، توسعه‌ی یک مدل پشتیبانی تصمیم‌گیری است که به تعیین میزان موجودی محصولات برای هریک از انبارها در یک سیستم تولیدی تک‌مرحله‌یی با چندین تولیدکننده‌ی مجزا، تحت یک استراتژی همکاری برای کاهش هزینه‌های سیستم مدیریت می‌شوند، کمک می‌کند. در توسعه‌ی مدل پیشنهادی، این مقاله به تجزیه و تحلیل چگونگی تأثیر نرخ تولید بر سطوح موجودی ماده‌ی خام، سرعت تولید ماشین‌آلات، خرابی محصولات و تحویل به موقع محصولات به انبارها در سیستم می‌پردازد و نشان می‌دهد که چگونه میزان تولید باید برای کمینه‌سازی

هزینه‌ی تولید، موجودی مواد اولیه و توزیع به موقع محصولات تعیین شود. علاوه بر این، با توجه به تقاضای خاص، تحت عدم قطعیت، این مقاله از انتخاب بهینه‌ی ماشین‌ها از مجموعه‌یی از ماشین‌های موازی موجود پشتیبانی می‌کند و همچنین مقدار بهینه‌ی مواد اولیه در هریک از انبارهای مربوط به کارخانجات را تعیین می‌کند.

ساختار این نوشتار به گونه‌یی است که در بخش دوم موضوع مورد مطالعه در این مقاله توضیح داده می‌شود و در بخش سوم یک مدل شبیه‌سازی شده برای حمایت از تصمیمات موجودی، تولید و توزیع در یک سیستم تولیدی تک‌مرحله با چندین نوع از ماشین‌های موازی چندمنظوره توسعه می‌یابد. در بخش چهارم مدل در یک آزمایش عددی نشان داده شده و در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. بیان مسئله

در این بررسی، سناریویی مورد مطالعه قرار گرفته که در آن یک شرکت تولیدی، متشکل از چند کارخانه با پراکندگی جغرافیایی، چند نوع محصول را در هریک از مجموعه کارخانه‌های خود تولید می‌کند؛ در برخی از کارخانه‌ها محصولات مشابه تولید می‌شود و در برخی از آنها محصولاتی خاص تولید می‌شود. در هر یک از این کارخانه‌ها چند نوع ماشین چندمنظوره موجود است که هرکدام‌شان توانایی تولید چند نوع محصول ویژه را دارند. همچنین هریک از این ماشین‌ها قابلیت تنظیم سرعت نرخ تولید را به صورت انعطاف‌پذیر دارند. این شرکت تولیدی محصولات خود را بنا بر سفارشی که از سمت هریک از انبارهای خود می‌گیرد، تولید می‌کند. مکان این انبارها نسبت به هم دارای پراکندگی جغرافیایی هستند. در این مطالعه زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی مد نظر است؛ سیستمی که شامل چند تأمین‌کننده‌ی مواد اولیه، چند تولیدکننده و خرده‌فروش‌هاست. مواد اولیه به صورت نامحدود در اختیار تأمین‌کنندگان قرار دارد، که با توجه به میزان سفارش هر نوع ماده‌ی خام توسط هریک از کارخانه‌ها در هر دوره‌ی زمانی با توجه به فاصله‌ی زمانی مسافت تأمین‌کننده تا تولیدکننده ارسال می‌شود. مشتریان برای تأمین کالای خود به خرده‌فروش‌ها مراجعه می‌کنند. نرخ ورود مشتریان تابع توزیع مثلثی است. نوع محصول انتخابی توسط مشتریان احتمالی با تابع توزیع یکنواخت به خصوص در هر یک از انبارهای خرده‌فروشان است. سیاست موجود در هریک از انبارهای خرده‌فروش S,s است که به محض ورود مشتری، خرده‌فروش دو کار را انجام می‌دهد. یکی این که به میزان کمبود موجودی از بیشینه موجودی انبار به بالادستی خود کالا سفارش دهد و دیگر این که به کالای مورد نیاز مشتری پاسخ دهد مشروط بر آن که موجودی به اندازه‌ی تقاضای مشتری در انبار موجود باشد. هزینه‌هایی که در این سیستم تحمیل می‌شود شامل هزینه‌ی نگهداری است. در صورتی که سطح موجودی پاسخگوی نیاز مشتری نباشد، مشتری به صورت ناراضی از سیستم خارج شده و هزینه‌ی مشتری از دست رفته به سیستم افزوده می‌شود. کالای سفارش داده شده با توجه به زمان حمل ونقل هر سطح، از تولیدکننده به خرده‌فروشان ارسال می‌شود. با توجه به پراکندگی جغرافیایی تولیدکنندگان و انبارها، هرکدام از انبارها باید مشخص کنند که سفارش خود را ابتدا به کدام تولیدکننده بدهند که هزینه‌های حمل و نقل را کاهش دهند. همچنین براساس میزان سفارش‌ها هرکارخانه باید ترکیبی از تعداد ماشین‌آلات خود را انتخاب کند به گونه‌یی که باعث کاهش هزینه‌های بیکاری ماشین‌آلات، هزینه‌های ثابت خرید ماشین‌آلات، هزینه‌های تعمیر، نگهداری ماشین‌آلات و عدم تحویل به موقع محصولات شود. به دلیل عدم قطعیت تقاضا در هر دوره زمانی، هرکارخانه باید موجودی مواد اولیه‌ی خود را در سطح مناسبی نگهدارد تا باعث کاهش هزینه‌های نگهداری مواد اولیه، هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌ی کمبود ماده‌ی خام شود. در صورتی که ماده‌ی اولیه برای تولید محصول در انبار کارخانه موجود نباشد، با افزایش موجودی ماده‌ی خام، تولید متوقف شده و باعث عدم تحویل به موقع کالا به انبارها می‌شود. یکی دیگر از چالش‌های تولیدکننده انتخاب سرعت نرخ تولید ماشین‌آلات و سیاست تغییر سرعت هر نوع از ماشین در هریک از کارخانه‌هاست.

۳. مدل‌سازی شبیه‌سازی

برنامه‌ریزی تولید و انتخاب تأمین‌کننده یکی از اجزای مهم و حیاتی برای تولیدکننده و زنجیره‌ی تأمین است. چنان که در مقدمه بیان شد، به علت پیچیدگی حل مسئله و عدم قطعیت آن، فرمول ریاضی بسته‌یی برای تابع هدف مسئله وجود ندارد و در نتیجه استفاده از ابزارهای تقریبی به جای دقیق توجیه‌پذیر می‌شود. یکی از این ابزارها شبیه‌سازی است. از طریق «شبیه‌سازی» می‌توان تابع هدف مسئله را تخمین زد. به همین دلیل شبیه‌سازی، ابزار مناسبی برای حل این گونه مسائل است. برخی از محققان از نرم‌افزار ارنا[۲] برای شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند؛ افشار و همکاران[۲۳] برای کنترل موجودی و تولید خود با توجه به سیاست خط‌مشی حفاظت از محیط زیست و رضایت مشتری، از نرم‌افزار ارنا برای سه هدف: هزینه‌ها، میزان انتشار و رضایت مشتری بهره برده اند. الیاسی و همکاران[۲۴] نیز یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی تصادفی برای برنامه‌ریزی فروش و عملیات با ارنا شبیه‌سازی کردند که تقابل میان دو مدیریت استراتژیک موجود ـ سیاست‌های خطی و ثابت ـ را نشان دادند.

برای مثال، در پژوهش حاضر شبیه‌سازی سیستم مفروض با استفاده از نرم‌افزار ارنا نسخه ۱۴ انجام شده است. مراحل شبیه‌سازی این سیستم تولیدی در قالب ۵ قسمت مجزا بیان می‌شود. چهار قسمت اول مربوط به منطق شبیه‌سازی شده در ارناست و در قسمت ۵، مراحل بهینه شدن متغیرهای تصمیم توسط نرم‌افزار آپتکوست[۳] توضیح داده می‌شود.

۱.۳. فرض‌های مدل شبیه‌سازی

مفروضات مدل در این مقاله در سه بخش انبار، تولید و تأمین‌کننده‌ی ماده‌ی خام در نظر گرفته شده است:

انبار

- نرخ ورود مشتریان به هر انبار غیرقطعی است و از تابع توزیع یونیفرم پیروی می‌کند.
- مشتریان در هر دوره در یک روز با هم وارد می‌شوند.
- لحظه‌ی ورود مشتریان در هر انبار با انبارهای دیگر یکسان نیست.
- تقاضای هر مشتری برای هر انبار و هر محصول غیرقطعی است.
- در صورت برآورده شدن تمام تقاضا، مشتری محصول خود را از انبار خریداری می‌کند.
- میزان سفارش هر انبار از مدل موجودی S,s پیروی می‌کند.
- سفارش محصول از انبار به کارخانه f بر اساس اولویت‌های برنامه‌ریزی شده تعیین شده است.

- شرط پذیرفتن سفارش انبار توسط کارخانه با اولویت بالاتر، تحویل سفارش توسط کارخانه تا قبل از شروع دوره بعدی است، در غیر این صورت سفارش به اولویت‌های پایین‌تر داده می‌شود.
- در صورتی که f تا کارخانه توانایی تحویل سفارش به انبار تا قبل از شروع دوره جدید را نداشته باشد، انبار مورد نظر از انبارهای اطراف خود سفارش را تأمین می‌کند.
- در رابطه‌ی بین انباری، انبار نیازمند بر اساس هزینه‌های حمل و نقل اولویت خود را برای دریافت کالا از انبارهای اطراف مشخص می‌کند.
- در رابطه‌ی بین انباری، امکان انتقال محصول بین انبارهای داخل کشور یا امکان انتقال به انبارهای خارج ازکشور، امکان‌پذیر است، اما انتقال محصول از انبارهای خارج ازکشور به داخل کشور ممنوع است.
- هر انبار مجاز به تحویل محصول به انبار مورد نظر به مقدار صحیح از بار یک کامیون برای محصول p است.
- تأمین تمام سفارش توسط یک یا چند انبار با توجه به ترتیب اولویت‌بندی شده هر انبار امکان‌پذیر است.

تولید

- هر کارخانه‌ی f دارای m نوع ماشین است.
- از هر m نوع ماشین n تا ماشین به صورت موازی کار می‌کند.
- هر نوع ماشین توانایی تولید k نوع محصول را دارد.
- هر ماشین قادر به تنظیم سرعت تولید محصول در s حالت مختلف است.
- سرعت ماشین با خرابی ماشین و خرابی محصول رابطه‌ی مستقیم دارد.
- زمان خرابی ماشین‌آلات غیر قطعی است.
- محصولات خراب تعمیر نمی‌شوند.
- محصولات خراب در تولید محصول جدید به کار گرفته می‌شوند.
- هر محصول توسط یک نوع ماده‌ی خام تولید می‌شود.
- هر کارخانه r نوع ماده‌ی خام مصرف می‌کند.
- محصولات خراب با توجه به ماده‌ی خام استفاده شده در آنها بعد از تجزیه به موجودی همان نوع ماده‌ی خام در انبار کارخانه مورد نظر اضافه می‌شود.
- سفارش تولید توسط انبارها برای هر کارخانه فقط تا روز x هر دوره به طول می‌انجامد.

تأمین‌کننده

- موجودی ماده‌ی خام هر کارخانه در ابتدای هر دوره مقداری ثابت است.
- سفارش مواد خام توسط کارخانه‌ها در روز x به‌اندازه مقدار ثابت موجودی در دوره بعد، به علاوه‌ی مقدار مورد نیاز ماده‌ی خام برای تکمیل سفارش در دوره‌ی جاری در نظر گرفته شده است.

متغیرهای تصمیم و پارامترهای مسئله عبارت‌اند از:

- **متغیرهای تصمیم مسئله**

TS_{dp} بیشینه‌ی موجودی محصول pام در انبار dام؛
RS_{dp} نقطه‌ی سفارش‌دهی انبار dام برای محصول pام؛
NM_{fm} کل تعداد ماشین نوع mام در کارخانه‌ی fام؛
SM_{fmt} شرط تغییر سرعت ماشین mام در کارخانه‌ی fام با سطح tام؛
FR_{fr} مقدار ثابت سفارش‌دهی ماده‌ی خام rام در کارخانه‌ی fام.

- **پارامترهای مسئله**

pc_{dp} احتمال انتخاب محصول pام در انبار dام توسط مشتری؛
EF_{de} اولویت‌بندی انتخاب کارخانه‌ی منتخب برای سفارش تولید از طرف انبار dام با اولویت e؛
PB_{ms} احتمال تولید محصول خراب توسط ماشین نوع mام با سرعت sام؛
TP_{ps} زمان تولید محصول pام توسط ماشین با سرعت s؛
TS_{fd} زمان تحویل سفارش توسط سیستم حمل‌ونقل از کارخانه‌ی fام با انبار dام؛
TB_{ad} زمان تحویل سفارش توسط سیستم حمل‌ونقل از کارخانه‌ی aام به انبار dام؛
EB_{de} اولویت eام انبار dام به انبارهای اطراف خود به منظور جبران کمبود موجودی؛
CTF_{fd} پارامتر هزینه‌ی حمل‌ونقل محصولات تولید شده از کارخانه‌ی fام به انبار dام؛
CTS_{do} هزینه‌ی حمل‌ونقل محصولات بین انبار متقاضی dام و انبار ارضا کننده‌ی o؛
CTR_{fr} هزینه‌ی حمل‌ونقل مواد خام از تأمین‌کننده‌ی rام به کارخانه‌ی fام؛
CPE_{p} هزینه‌ی تولید هر واحد محصول ناقص از نوع pام همراه با هزینه‌ی بازتولید به محصول جدید؛
CM_{m} هزینه‌ی هر ساعت بیکاری ماشین نوع mام؛
CLC_{dp} هزینه‌ی مشتری از دست رفته به ازای محصول pام در انبار dام؛
CQ_{p} هزینه‌ی انبارداری هر واحد محصول Pام در یک دوره؛
CLR_{r} هزینه‌ی کمبود مواد خام نوع rام در کارخانه به ازای هر روز کاری.

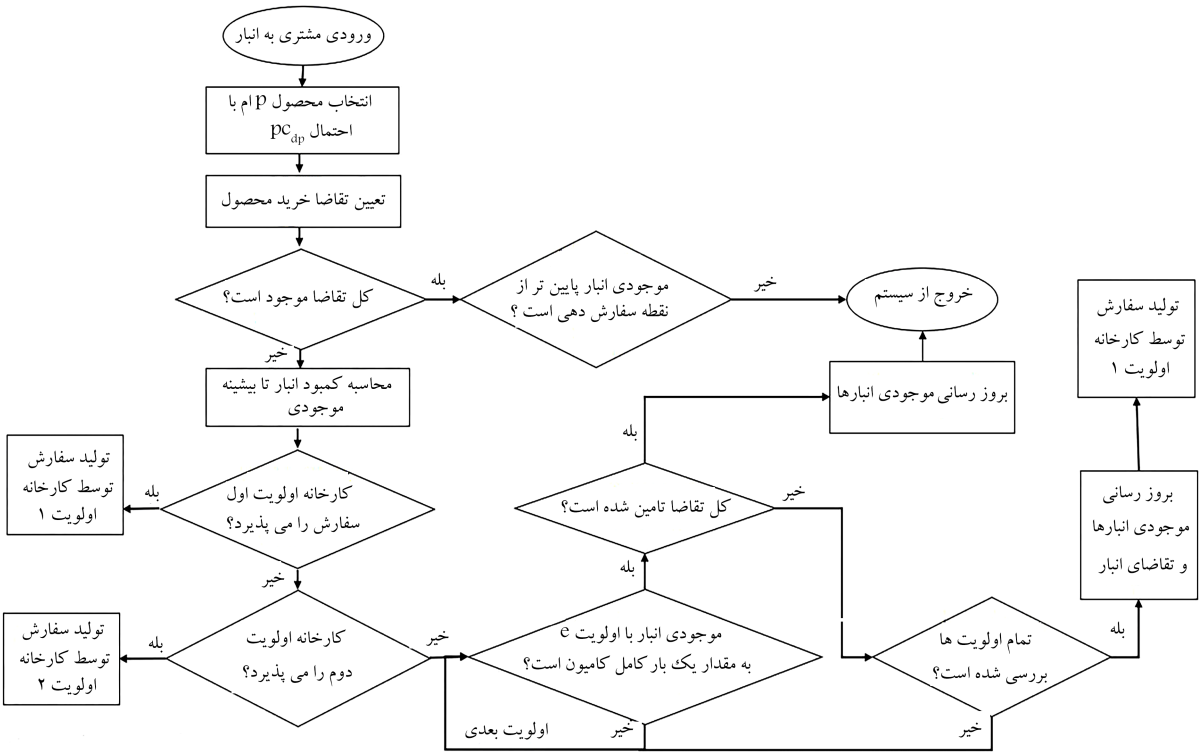
- **متغیرهای مسئله**

cu_{d} نرخ ورود مشتریان به انبارdام؛
C_{dp} مقدار تقاضای مشتری برای محصول Pام در انبار dام؛
IS_{dp} موجودی انبار dام برای محصول pام؛
DF_{dp} کل محصول pام که کارخانه برای تقاضای انبار dام باید تولید کند (شامل محصولات سالم و خراب)؛
D_{dp} مقدار سفارش انبار dام برای محصول pام به تولیدکننده؛
TF_{ms} زمان خرابی ماشین mام با سرعت s؛
TR_{ms} زمان تعمیر ماشین mام با سرعت s؛
IR_{fr} موجودی ماده‌ی خام نوع rام در کارخانه‌ی fام؛
SR_{fr} مقدار سفارش ماده‌ی خام rام برای کارخانه‌ی fام.

۲.۳. شبیه‌سازی در ارنا

۱.۲.۳. شبیه‌سازی انبار

شروع شبیه‌سازی با ورود مشتری‌ها به انبارها شروع می‌شود. طبق چارت شکل ۱ بعد از ورود مشتری به انبار، هرکدام از مشتریان باید تصمیم بگیرند که کدام محصول را انتخاب کنند. بعد از انتخاب محصول میزان تقاضای خرید برای آن محصول را باید تعیین کند. بعد از این مرحله موجودی انبار چک می‌شود تا تعیین شود موجودی



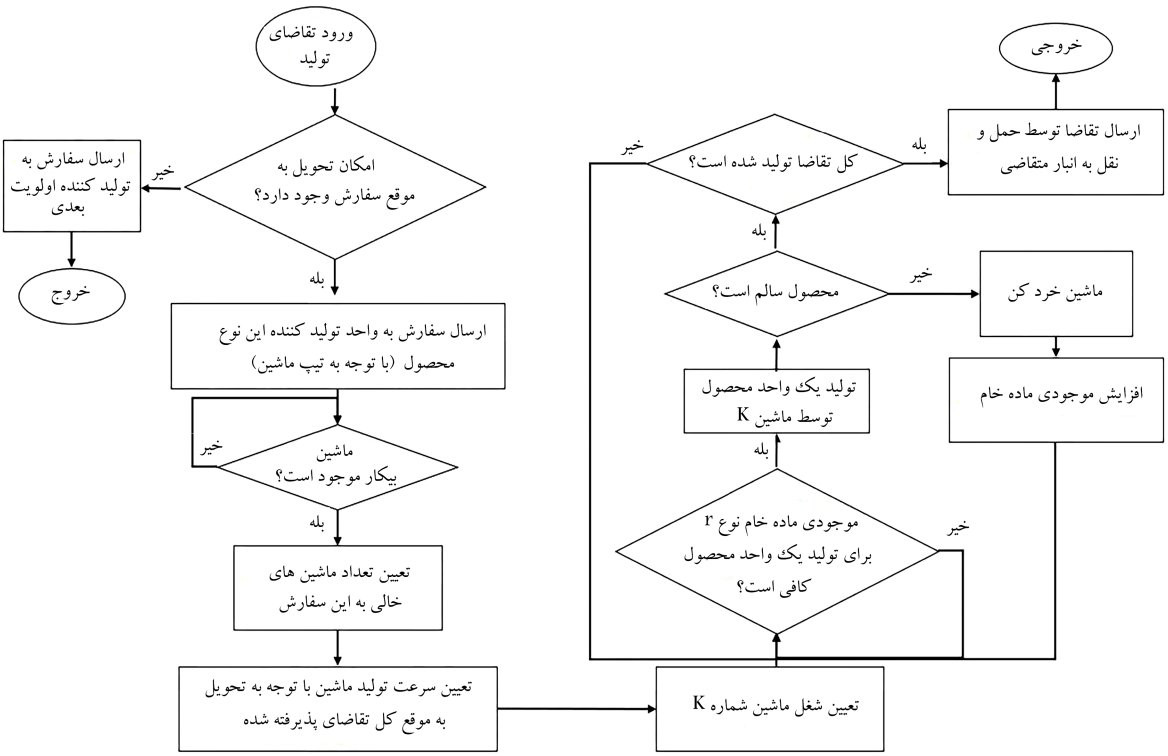
شکل ۱. نحوه‌ی عملکرد مدل شبیه‌سازی شده در بخش انبار.

انبار به میزان درخواست شده جواب‌گو است یا خیر؟ اگر موجودی به اندازه کافی بود مشتری سفارش خود را دریافت کرده و از انبار خارج می‌شود، اما قبل از خروج از سیستم موجودی چک می‌شود که به نقطه‌ی سفارش‌دهی نرسیده باشد. چنانچه موجودی کافی نبود با توجه به میزان تقاضا و نوع محصول هزینه‌های مشتری از دست رفته محاسبه شده و اگر موجودی انبار پایین‌تر از نقطه سفارش‌دهی رسیده بود انبارکمبود خود را تا بیشینه محاسبه کرده و به تولیدکننده‌ی با اولویت بالاتر تقاضای خود را برای تولید ارسال می‌کند (این اولویت‌بندی با توجه به هزینه‌های حمل و نقل تعیین شده است). در ضمن، مدل موجودی در انبارها S,s در نظرگرفته شده است. سپس، تولیدکننده با دریافت سفارش جدید، زمان لازم برای تولید سفارش و تحویل به موقع تا قبل از شروع دوره‌ی جدید را حدودا و با توجه به زمان تولید سفارش‌های قبلی که پذیرفته است تخمین می‌زند. چنانچه در موعد مقرر نتواند سفارش را تحویل دهد تقاضا را رد می‌کند. با رد تقاضا توسط تولیدکننده با اولویت اول، به همین شکل تقاضا توسط تولیدکننده‌های با اولویت‌های بعدی بررسی می‌شود. اگر هیچ‌یک از تولیدکنندگان توان تولید محصول در موعد مقرر را نداشته باشند به ناچار انبار از نزدیک‌ترین انبار به خود برای تأمین سفارش خود شروع می‌کند. هر انبار موجودی خود را به اندازه یک بارکامیون با توجه به نوع محصول چک می‌کند که چنانچه موجود بود به انبار متقاضی ارسال می‌کند و از تقاضای انبار به میزان یک بار از تقاضای انبارکاهش پیدا می‌کند. از این رو تقاضای باقی مانده دوباره توسط انبار تأمین‌کننده بررسی می‌شود تا موقعی که به اندازه یک بارکامیون موجودی نداشته باشد و هنوز تقاضا باشد، از طرف انبار متقاضی، بعد از این که انبار موجودی کافی نداشت انبار متقاضی به سراغ انبارهای اولویت بعدی می‌رود تا این که به اولویت آخر برسد. بعد از اولویت آخر چنانچه انبار متقاضی کل تقاضایش را دریافت نکرده باشد، تقاضای باقی‌مانده به تولیدکننده‌ی اول سپرده می‌شود که چنانچه در این دوره نتوانست تأمین بشود برای دوره‌ی بعدی سفارش در اولویت بالاتری قرار بگیرد. قبل از پایان هر دوره در روز x ام (دو روز بعد از ورود تمام مشتریان به انبارها) هزینه‌های مربوط به انبارداری هر محصول محاسبه می‌شود.

۲.۲.۳. شبیه‌سازی سیستم تولیدی

همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، انبار تقاضای خود را به کارخانه با توجه به اولویت‌بندی که از قبل تعیین شده است به ترتیب به هرکارخانه ارسال می‌کند. چنان که در شکل ۲ منطق به کار رفته در مدل دیده می‌شود، بعد از این که سفارش تولید به دست کارخانه می‌رسد، ابتدا زمان تقریبی تحویل سفارش بعد از تولید سفارش‌های قبلی محاسبه شده است. چنانچه تا قبل از شروع دوره‌ی بعدی (۳۰ روز کاری)، امکان تحویل به موقع سفارش وجود داشته باشد سفارش توسط کارخانه پذیرفته شده و در صف تولید قرار می‌گیرد، اما اگر امکان تحویل سفارش تا قبل از شروع دوره‌ی بعدی وجود نداشته باشد کارخانه مورد نظر سفارش را رد می‌کند تا انبار به سراغ اولویت‌های بعدی خود برود.

چنانچه سفارش توسط کارخانه پذیرفته شود، با توجه به نوع سفارش (نوع محصول)، به واحد تولیدکننده‌ی مربوط درکارخانه منتقل می‌شود. در آن‌جا سفارش در صف تولید باقی می‌ماند تا زمانی که ماشین یا ماشین‌های موجود در این واحد خالی شود. با توجه به تعداد ماشین‌های بیکار، ممکن است یک تقاضا به چند ماشین سپرده شود. قبل از شروع تولید یک به‌روزرسانی شامل کل سفارش‌های پذیرفته شده در این واحد انجام می‌گیرد. سرعت ماشین‌ها با توجه به زمان تحویل به موقع کل سفارشات تنظیم می‌شود؛ زیرا با توجه به عدم قطعیت تولید شامل خرابی ماشین‌ها، خرابی محصولات یا اوج تقاضا (انبارهای استانی توانایی ارضای سفارش انبارها را نداشته باشند)، امکان دارد که برنامه‌ریزی تولید را بهم بریزد، از این رو با توجه به مزیت تغییر سرعت این ماشین‌آلات کمینه سرعت لازم جهت تحویل به موقع سفارش‌ها تعیین می‌شود. در این مرحله ممکن است با آمدن سفارش‌های بعدی دوباره سرعت افزایش یا کاهش پیدا کند. بعد از تعیین سرعت ماشین‌های مربوط



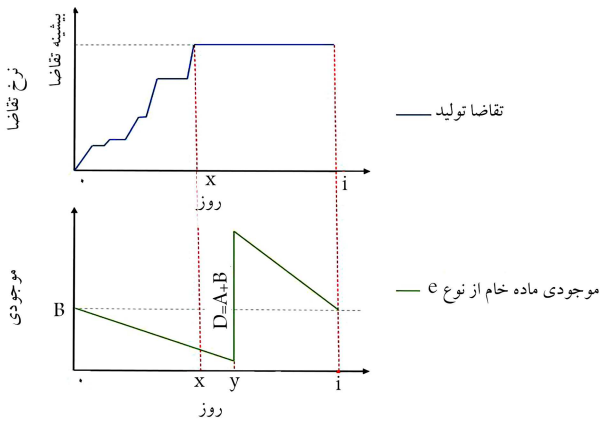
شکل ۲. نحوه‌ی عملکرد مدل شبیه‌سازی شده در بخش تولید.

به این سفارش، یک به‌روزرسانی دوباره از سفارش انجام می‌گیرد؛ زیرا ممکن است قبل از تولید این سفارش، موجودی این انبار به دلیل روابط بین انبارکاهش یافته باشد. بعد از تعیین سرعت ماشین و به‌روزرسانی سفارش، ماشین‌های اختصاص یافته روی محصول مورد نظر و سرعت تولید (زمان تولید محصول p، با توجه به سرعت ماشین) تنظیم می‌شود. تولید هر محصول توسط هر ماشین به صورت یک واحد یک واحد است. بعد از تولید هر نوع محصول، از موجودی ماده‌ی خام متناسب با نوع محصول در کارخانه مورد نظرکاهش می‌یابد.

بعد از تولید هر واحد محصول، این شرط بررسی می‌شود که محصول تولید شده سالم است یا خیر؟ اگر جواب «خیر» باشد به قسمت بازتولید فرستاده می‌شود تا دوباره به ماده‌ی خام تبدیل شود که در تولید محصول جدید به کار گرفته شود. اما اگر محصول سالم باشد یک به‌روزرسانی از سفارش باقی مانده، مربوط به این نوع سفارش جهت تولید صورت می‌گیرد و تا زمانی که میزان تولید سفارش باقی مانده به صفر نرسد، دوبار به همان ماشین تولیدکننده‌ی آن محصول فرستاده می‌شود تا کل سفارش، تولید شود. اما قبل از تولید باقی‌مانده سفارش، هر بار موجودی انبار ماده‌ی اولیه مربوط به این نوع محصول چک می‌شود؛ چنانچه موجودی ماده‌ی خام از مقدار مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول مشخص شده، کم‌تر باشد. تولید این ماشین تا رسیدن موجودی به مقدار لازم متوقف می‌شود. بعد از تولید کل سفارش مربوط به انبار کل سفارشات به سیستم حمل ونقل جهت تحویل به انبار سفارش دهنده ارسال می‌شود. به دلیل محاسبه هزینه‌ی انبار داری تمام انبارها در روز x ام، موجودی انبارها تا روز x افزایش پیدا نمی کند.

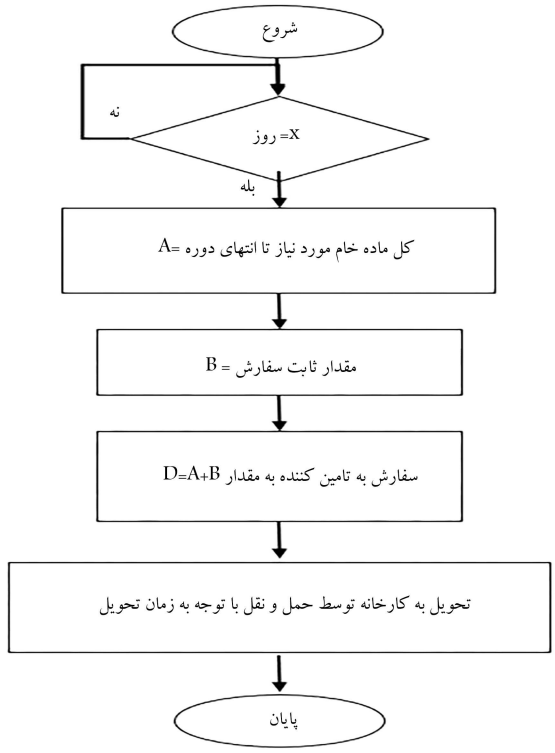
۳.۲.۳. شبیه‌سازی تأمین‌کننده‌ی ماده‌ی خام

در این بخش منطق به کار برده شده در خصوص میزان خرید ماده‌ی خام و همچنین وضعیت موجودی ماده‌ی خام، مربوط به انبار کارخانه بررسی می‌شود.



نمودار ۱. ارتباط بین سفارش تولید با موجودی ماده‌ی خام درکارخانه f ام .

چنان که پیش‌تر توضیح داده شد، از ابتدای هر دوره و به مرور زمان تقاضاهای مختلفی به هرکارخانه وارد می‌شود (نمودار ۱). تقاضا تا روز xام، در هرکارخانه به صورت گسسته رو به افزایش است. از روز xام به بعد تا انتهای دوره که با i نشان داده شده است تقاضای جدیدی به کارخانه ارسال نمی‌شود. زیرا برای کنترل بهتر مدل شرایط خاصی را در نظرگرفته‌ایم به این صورت که، در هر دوره مشتریان هرکدام از انبارها در یک روز به خصوص، به صورت یک‌جا وارد انبار می‌شود. از سوی دیگر تا چند روز قبل از روز xام هیچ مشتری وارد انبارها تا شروع دوره بعدی وارد نمی شود. با وارد نشدن مشتری تقاضای تولید جدیدی از طرف انبارها درخواست نمی‌شود، پس می‌توان نتیجه گرفت که از روز xام به بعد سفارش‌ها بسته شده و کارخانه برای آن دوره زمانی می‌تواند برنامه‌ریزی کند. همان‌طورکه در نمودار مربوط به وضعیت موجودی ماده‌ی خام نوع e درکارخانه fام نمودار ۱ دیده می‌شود، موجودی ماده‌ی



شکل ۳. نحوه‌ی عملکرد سفارش به تأمین‌کننده ماده‌ی خام.

خام در ابتدای دوره به مقدار B است. این موجودی ثابت که در هر کارخانه برای هر ماده منحصر به فرد است از ابتدای دوره با گرفتن سفارش تولید توسط کارخانه رو به کاهش است، که به دلیل تولید کارخانه که منجر به استفاده از ماده‌ی خام است پدید می‌آید. این کاهش موجودی تا روز x ادامه دارد. در روز xام، به دلیل بسته شدن سفارش‌ها، کارخانه مقدار کمبود ماده‌ی خام (A) مورد نیاز برای تکمیل تمام سفارشات گرفته شده تا انتهای دوره، همراه با مقدار ثابت سفارش (B) که مجموع آن برابر با D=A+B است را محاسبه کرده و به تأمین‌کننده سفارش می‌دهد. این سفارش در روز yام به کارخانه تحویل داده می‌شود. سپس، موجودی ماده‌ی خام از روز yام تا انتهای دوره یعنی روز iام تا مقدار B کاهش پیدا می‌کند. در ادامه به نحوه‌ی عملکرد شبیه‌سازیِ سفارش به تأمین‌کننده می‌پردازیم.

چنان که در شکل ۳ مشاهده می‌شود. در ابتدا هر دوره مقدار سفارش باید بررسی شود اما این مقدار را تا روز x نمی‌توان محاسبه کرد. بعد از روز xام مقدار A محاسبه شده و مقدار ثابت B هم در نظرگرفته می‌شود. سپس کارخانه، مجموع آنها را (D=A+B) به تأمین‌کننده سفارش داده و با توجه به فاصله‌ی تأمین‌کننده با کارخانه در موعد مقرر تحویل می‌گیرد.

۳.۳. مطالعه‌ی موردی

در این مطالعه، شرکت تولیدکننده‌ی لوله و اتصالات پلی‌اتلین تک‌جدار و دوجدار را به عنوان مطالعه‌ی موردی در نظرگرفته‌ایم. در این پژوهش یک سیستم تولیدی با دو کارخانه (f=۲) وجود دارد که دو کارخانه در دو نقطه‌ی جغرافیایی در یک کشور واقع‌اند. کارخانه شماره ۱ دارای دو تیپ ماشین (m=۱,۲) و کارخانه شماره ۲ دارای سه تیپ ماشین (m=۱, ۲, ۳) است که تعداد هرکدام از این ماشین‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. تعداد ماشین‌ها از نوع تیپ mام در کار خانه fام.

	$M1f1$	$M2f1$	$M1f2$	$M2f2$	$M3f2$	مجموع
تعداد	۳	۱	۲	۱	۴	۱۱

جدول ۲. بیشینه‌ی موجودی انبار dام برای محصول pام.

انبار	محصول					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۲۰۰
۲	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۳۰۰
۳	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۵۰
۴	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۱۵۰	۱۵۰
۵	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
۶	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
۷	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۴۰۰

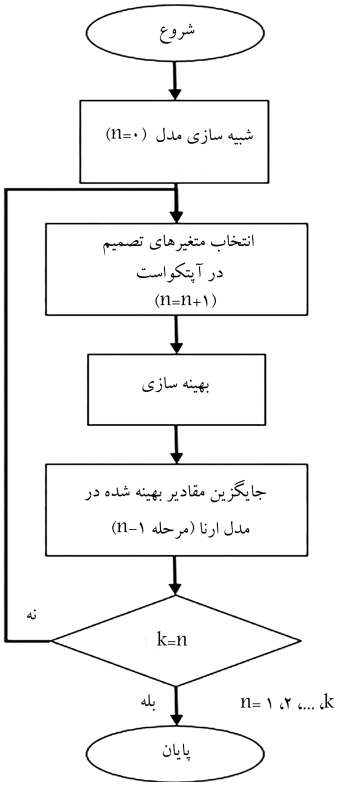
ماشین نوع ۱ (m=۱) توانایی تولید محصول ۱ و ۲ را دارد، ماشین نوع ۲ (m=۲) توانایی تولید محصول ۳ و ۴ را دارد و ماشین نوع ۳ (m=۳) توانایی تولید محصول ۵ و ۶ را دارد. هر ماشین دارای چهار نوع سرعت قابل قبول است که کمینه کیفیت مورد نیاز را برای تولید محصولات مورد نیاز در نظرگرفته‌ایم. بنابراین سرعت هر یک از این ماشین‌ها متناسب با ظرفیت اشغال شده‌ی آن ماشین به ازای هر روز کاری در سطح ۳ در نظرگرفته شده است، که مقادیر آنها به ترتیب ۴۰، ۵۰ و ۶۰ است. تعداد ماده‌ی خام مورد نظر در هر یک از کارخانه‌ها دو واحد (r=۱,۲) است. برای تولید محصول ۱، ۳ و ۵ از ماده‌ی خام نوع ۱ و محصول ۲، ۴ و ۶ از ماده‌ی خام نوع ۲ استفاده می‌شود. مقدار ثابت سفارش برای هر نوع ماده‌ی اولیه در هر کارخانه ۱۰۰۰۰۰ تعیین شده است. در این مسئله ۶ انبار استانی و یک انبار خارج و در مجموع ۷ انبار (d=۷) در نظرگرفته‌ایم. در قسمت روابط بین انباری برای تأمین تقاضای انبار درخواست‌کننده از انبارهای دیگر در مواقع ضروری، بین تمام انبارهای استانی رابطه‌ی گیرنده و فرستنده وجود دارد، اما انبار خارجی فقط نقش گیرنده را دارد. به عبارتی انبارهای استانی در رابطه‌ی بین انباری با انبار خارجی فقط نقش فرستنده را دارند. بیشینه‌ی موجودی انبار dام برای محصول pام در جدول ۲ نشان داده شده است.

هر زمان که موجودی انبار به نقطه سفارش‌دهی برسد انبار تقاضای تولید را به کارخانه می‌دهد.

بعد از تعریف مسئله در نرم‌افزار نوبت تنظیمات شبیه‌سازی است که در تحقیق جاری، نقطه‌ی تعادل یا گرم شدن سیستم معادل سه روز کاری، تعداد اجراهای شبیه‌سازی برابر ۱۰ بار، طول شبیه‌سازی ۳۶۰ روز (معادل یکسال) و زمان هر روز کاری برابر ۸ ساعت تعریف شده است.

۴.۳. بهینه‌سازی مدل

بعد از تخمین تابع هدف توسط نرم‌افزار ارنا، با استفاده از ابزار آپتکوست که مبتنی بر شیوه‌ی فرااِبتکاری «جستجوی پراکنده» است، مقدار تابع هدف محاسبه شده است.[۷] محققان در مطالعه‌یی برای ارائه‌ی یک سیستم بهینه‌ی کاهش زمان انتظار و افزایش سطح خدمات[۲۵]، بر اساس شرایط مختلف سیستم، نرخ خروجی در یک مرکز پزشکی را مطابق با یک شاخص عملکرد کلیدی، (به عنوان مثال، میانگین زمان انتظار بیمار) افزایش داده‌اند که با استفاده از نرم‌افزار آپتکوست، دو هدف: الف)

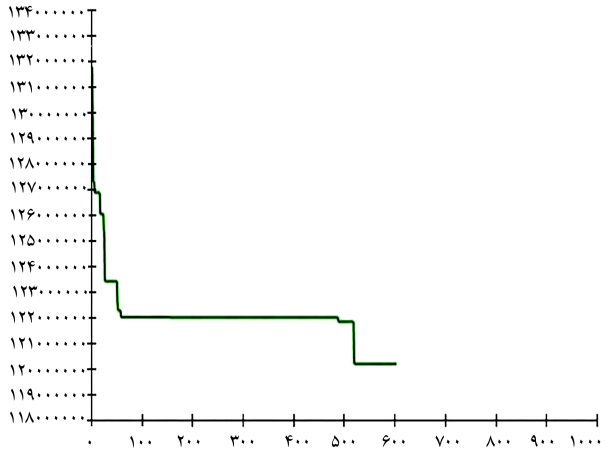


شکل ۴. نحوه‌ی بهینه‌سازی مدل در آپتکوست.

بهینه‌سازی منابع و ب) برنامه‌ریزی منابع با توجه به وضعیت سیستم را بهینه کرد. در این مقاله، رویکرد بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم با استفاده از روش مرحله به مرحله است؛ یعنی شرط بهینه‌سازی هر مرحله بهینه شدن مرحله‌ی قبلی است. به عبارتی مراحل بهینه‌سازی با استفاده از روش تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی با توجه به درجه اهمیت آنها انجام شده است، که در دنیای واقعی با این نوع روش تصمیم‌گیری می‌شود. مراحل بهینه کردن را در قالب یک مدل مفهومی در شکل ۴، به تصویر کشیده‌ایم. همان‌طورکه در نمودار ۲ نشان داده شده است ابتدا باید مدل شبیه‌سازی مسئله‌ی مورد بررسی در نرم‌افزار ارنا طراحی شود. سپس در مرحله‌ی بعد، از نرم‌افزار آپتکوست موجود در خود ارنا به منظور بهینه کردن اولین سری متغیرهای تصمیم استفاده می‌کنیم.

۱.۴.۳. مرحله‌ی اول

اولین مرحله‌ی بهینه کردن مربوط به بیشینه موجودی انبارهای استانی است. ابتدا در نرم‌افزار آپتکوست این متغیرها را در بخش کنترلی به عنوان متغیرهایی که آپتکوست باید مقداردهی کند را مشخص می‌کنیم. بعد از انتخاب متغیرهای تصمیم، نوبت تنظیمات این متغیرهاست که باید حد پایین و بالای مقداردهی، که آپتکوست مجاز به تغییر آن است همراه با مقدار پیشنهادی را برای هرکدام از متغیرهای تصمیم تعریف کنیم. این محدوده برای انبارهای استانی داخلی از ۱۰۰ تا ۵۰۰ و برای انبار خارج ازکشور از ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ تعیین شده است. همچنین مقدار پیشنهادی را حد وسط بازه در نظر گرفته‌ایم. در این مرحله هیچ محدودیتی در نظر گرفته نشده است. در قسمت بعدی که مربوط به انتخاب تابع هدف است، تابع هدف مربوط به این بخش ـ شامل هزینه‌های مشتری از دست رفته و هزینه‌ی انبارداری ـ که از پیش به عنوان خروجی مدل ارنا تعریف شده است را انتخاب می‌کنیم. تابع هدف مشخص شده را روی حالت کمینه‌سازی تعریف می‌کنیم. در آخر، همان‌طورکه در نمودار ۲ دیده



نمودار ۲. نمودار بهینه‌سازی مربوط به هزینه‌های متغیرهای بیشنیه موجودی انبارها (مرحله‌ی اول آپتکوست).

جدول ۳. بیشینه مقدار مجاز محصول pام در انبار dام.

انبار	محصول					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۳۴۸	۳۶۴	۳۵۰	۳۰۱	۳۷۱	۳۲۱
۲	۴۳۵	۳۶۲	۳۸۲	۳۵۶	۴۳۰	۴۰۶
۳	۳۸۸	۴۲۷	۳۶۶	۴۰۱	۴۱۲	۴۰۹
۴	۴۱۷	۴۸۱	۳۵۳	۴۳۸	۳۵۵	۴۶۸
۵	۳۷۶	۳۵۲	۳۸۲	۳۱۱	۳۱۶	۳۵۶
۶	۲۸۲	۲۴۹	۲۷۷	۳۶۴	۳۸۰	۲۷۱
۷	۸۰۲	۸۸۲	۹۰۰	۷۴۱	۷۹۷	۸۷۹

می‌شود ۶۰۳ سناریو توسط آپتکوست مورد بررسی قرار می‌گیرد که سناریوی ۵۳۰ به عنوان سناریوی بهینه انتخاب می‌شود و در آن، مقدار تابع هدف از ۱۳۴۰۰۰۰۰۰ به ۱۲۰۰۰۰۰۰۰ کاهش می‌یابد.

بیشترین مقدار مجاز محصول pام در انبار dام به صورت بهینه شده در جدول ۳ نشان داده شده است:

طبق مدل مفهومی در شکل ۵ بعد از بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم، باید مقادیر بهینه شده به عنوان پارامتر در مدل پایه‌ی ارنا جایگزین مقادیر قبلی بشود. سپس مرحله‌ی دوم بهینه‌سازی شروع می‌شود.

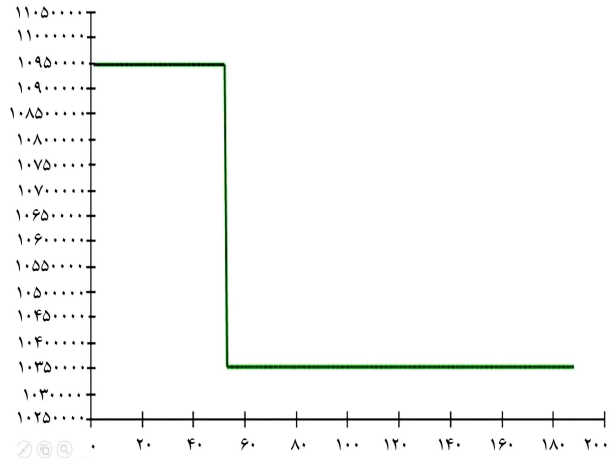
۲.۴.۳. مرحله‌ی دوم

چنان که پیش‌تر توضیح داده شد، بعد از وارد کردن مقادیر بهینه شده‌ی مرحله‌ی اول در مدل ارنا مانند مرحله‌ی قبل، تنظیمات مربوط به مرحله‌ی دوم را انجام می‌دهیم. در این مرحله متغیر تصمیم عبارت است از تعداد ماشین‌آلات از هر نوع در هر کارخانه. محدوده‌ی مقداردهی این نوع متغیر را بین ۱ تا ۸ تعیین می‌کنیم. و مقدار پیشنهادی را روی ۴ تنظیم می‌کنیم. تابع هدف این مرحله هزینه‌های مربوط به مشتری از دست رفته و بیکاری ماشین‌آلات است. نتیجه‌ی خروجی تابع هدف بهینه شده در نمودار ۳ دیده می‌شود.

مقادیر بهینه‌ی تعداد ماشین‌آلات در جدول ۴ آمده است.

۳.۴.۳. مرحله‌ی سوم

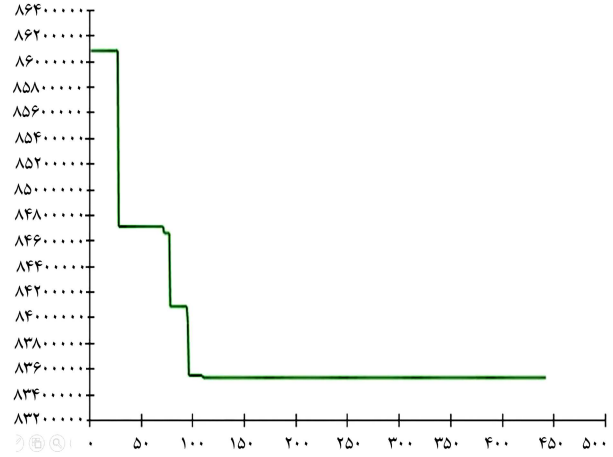
بعد از بهینه کردن مرحله‌ی دوم، مانند مرحله‌ی قبل، مقادیر بهینه شده را در مدل ارنای که مرحله‌ی دوم را بهینه کرد جایگزین و سپس مرحله‌ی سوم را اجرا می‌کنیم.



نمودار ۳. نمودار بهینه مربوط به هزینه‌های تعداد ماشین‌آلات در مرحله‌ی اول (مرحله‌ی دوم آپتکوست).

جدول ۴. تعداد ماشین نوع mام در کارخانه fام.

	$M1f1$	$M2f1$	$M1f2$	$M2f2$	$M3f2$	مجموع
تعداد	۴	۴	۵	۳	۴	۲۰



نمودار ۴. نمودار بهینه مربوط به نقطه‌ی سفارش‌دهی انبارها (مرحله‌ی سوم آپتکوست).

در این مرحله متغیر تصمیم نقطه‌ی سفارش‌دهی انبارهای خرده‌فروشان است. بازه مقداردهی برای این نوع متغیر تصمیم از ۱۰۰ تا به مقدار بیشنه انبارداری بهینه شده است و مقدار پیشنهادی را حد پایین در نظرگرفته‌ایم. محدودیت در نظرگرفته شده در این مرحله شامل کوچک‌تر بودن نقطه‌ی سفارش‌دهی از بیشینه‌ی انبارداری است ($TS_{dp} > RS_{dp}$). در مرحله‌ی قبل تابع هدف این بخش شامل مجموع هزینه‌های مشتری از دست رفته و هزینه‌های انبارداری است که در نمودار ۴ تابع هدف بهینه شده را نشان می‌دهد و همچنین مقادیر بهینه آن در جدول ۵ بیان شده است:

۴.۴.۳. مرحله‌ی چهارم

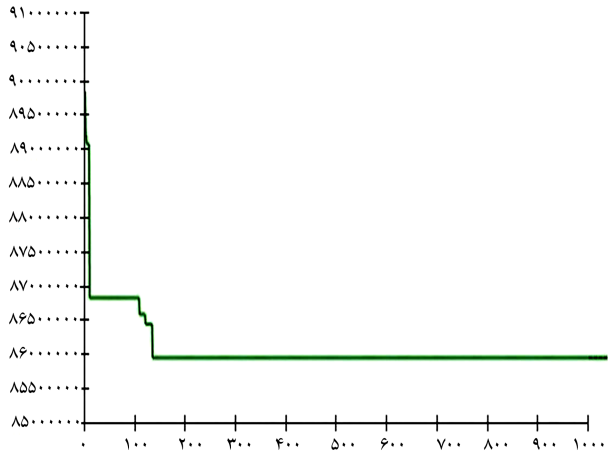
در این مرحله بعد از وارد کردن مقادیر بهینه شده‌ی مرحله‌ی قبل در مدل ارنا، مرحله‌ی چهارم بهینه‌سازی را انجام می‌دهیم. در این مرحله یکی از متغیرهای تصمیم، مربوط به شرط تغییر سرعت ماشین است که بر اساس روزهای کاری برنامه‌ریزی شده به ازای هر نوع ماشین در هر کدام از کارخانه‌هاست. اما از آن‌جا که در مراحل قبل سرعت ماشین‌ها روی پایین‌ترین سرعت به طور ثابت تنظیم شده بود، می‌خواهیم این سرعت را با توجه به شروطی که قبلاً توضیح داده شد، در طول شبیه‌سازی متغیر کنیم. از طرفی تغییر سرعت ماشین‌ها باعث تغییر در تصمیم‌گیری در تعداد ماشین‌آلات بهینه در مدل می‌شود. به همین منظور در این قسمت دو نوع متغیر تصمیم شامل «شرط تغییر سرعت ماشین به ازای روزهای کاری برنامه‌ریزی شده» و «تعداد ماشین‌آلات از هر نوع در هر کارخانه» داریم. در این مرحله حد بالا و پایین متغیر تصمیم نوع اول را بین ۱۰ تا ۸۰ روز کاری تنظیم می‌کنیم و همچنین محدودیت مربوط به این متغیر با توجه به هر سطح به صورت (سطح ۳< سطح ۲< سطح ۱) تعیین می‌شود. در متغیر تصمیم نوع دوم حد بالا و پایین را بین ۱ تا ۸ تنظیم می‌کنیم. تابع هدف این بخش شامل هزینه‌های مشتری از دست رفته، بیکاری ماشین‌آلات، خرابی محصولات است.

نمودار بهینه‌ی این بخش مطابق نمودار ۵ است و تعداد ماشین‌های بهینه از نوع mام در کارخانه‌ی fام در جدول ۶ بهینه شده است.

در ادامه شرط تغییر سرعت ماشین به ازای روزهای برنامه‌ریزی شده در جهت تولید، به صورت بهینه شده در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۵. نقطه‌ی سفارش‌دهی محصول pام در انبار dام.

انبار	محصول					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۳۲۲	۳۵۴	۳۴۹	۳۰۰	۳۷۱	۳۱۹
۲	۴۲۶	۳۵۹	۳۷۹	۳۳۲	۴۱۹	۴۰۶
۳	۳۸۷	۴۰۰	۳۴۱	۳۹۹	۴۱۲	۳۹۲
۴	۳۸۵	۴۶۱	۳۳۹	۴۳۳	۳۵۴	۳۶۸
۵	۳۷۶	۳۳۴	۳۷۳	۲۹۹	۳۱۴	۳۵۴
۶	۲۴۷	۲۴۹	۲۷۶	۲۶۴	۲۸۰	۲۶۲
۷	۷۷۷	۸۶۸	۸۹۵	۷۴۰	۷۹۷	۸۵۴



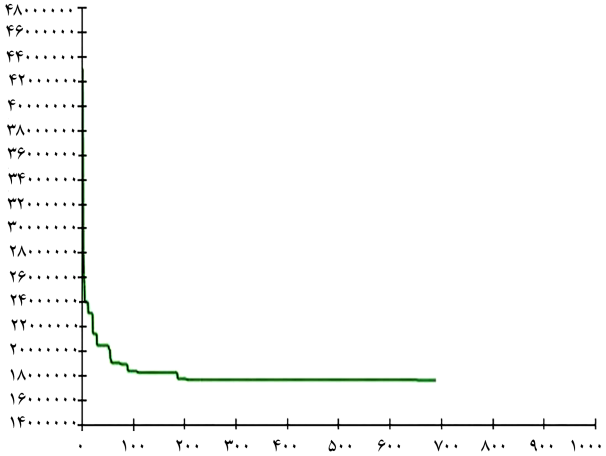
نمودار ۵. نمودار بهینه‌سازی مربوط به هزینه‌های ماشین‌آلات و خرابی محصولات (مرحله‌ی چهارم آپتکوست).

جدول ۶. تعداد ماشین نوع mام در کارخانه fام.

	$M1f1$	$M2f1$	$M1f2$	$M2f2$	$M3f2$	مجموع
تعداد	۳	۴	۳	۴	۳	۱۷

جدول ۷. نرخ تغییر سرعت ماشین به ازای روزهای کاری برنامه‌ریزی شده.

	$M1f1$	$M2f1$	$M1f2$	$M2f2$	$M3f2$
سطح ۱	۳۲	۲۷	۲۸	۲۶	۳۱
سطح ۲	۴۲	۴۸	۳۲	۳۲	۳۹
سطح ۳	۴۴	۵۰	۵۰	۴۵	۴۵



نمودار ۶. تابع هدف مرحله‌ی پنجم در نرم‌افزار آپتکوست.

جدول ۸. مقدار ثابت سفارش ماده‌ی خام به تأمین کننده.

	ماده‌ی نوع ۱	ماده‌ی نوع ۲
کارخانه‌ی ۱	۸۷۳۹۶	۳۷۲۵۶
کارخانه‌ی ۲	۸۶۱۷۲	۷۳۶۰۳

۵.۴.۳. مرحله‌ی پنجم

بعد از مرحله‌ی چهارم و اضافه کردن مقادیر بهینه شده‌ی این مرحله به مرحله‌ی قبل، در مدل ارنا نوبت به مرحله‌ی پنجم یا آخر می‌رسد. در نرم‌افزار آپتکوست مقدار ثابت سفارش ماده‌ی خام را به عنوان متغیر تصمیم در نظرگرفته و حد بالا و پایین را بین (۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰) در نظرگرفته ایم. مقدار پیشنهادی را حد وسط در نظر گرفته‌ایم. مراحل بهینه‌سازی تابع هدف این قسمت که شامل هزینه‌های کل است در نمودار ۶ توسط آپتکوست نشان داده شده است.

همچنین مقدار ثابت سفارش ماده‌ی خام یا موجودی ماده‌ی خام در ابتدای هر دوره برنامه‌ریزی شده به صورت بهینه شده در جدول ۸ نشان داده شده است. مقادیر بهینه شده‌ی این مرحله را در مدل ارنای مرحله‌ی قبل جایگزین مقادیر قبلی کرده و به این ترتیب مدل ارنا به طورکامل بهینه شده و آماده‌ی خروجی گرفتن و تحلیل نتایج خروجی است.

۴. تجزیه و تحلیل نتایج خروجی

بعد از بهینه کردن مدل با استفاده از تحلیل حساسیت، به بررسی و مطالعه میزان تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل می‌پردازیم. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که تحلیل حساسیت روشی برای پیش‌بینی تغییرات درخروجی‌های مدل، با اعمال تغییرات در ورودی‌هاست. در این مطالعه، تحلیل حساسیت بر روی دو پارامتر مدل اعم از نرخ خرابی ماشین‌ها به طور مستقل و همچنین نرخ تقاضا با پنج تکرار انجام می‌گیرد و در آخر میزان تأثیرگذاری رابطه‌ی بین انباری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱.۴. آنالیز حساسیت پارامتر توزیع خرابی ماشین نوع اول تا سوم بر روی سناریوی بهینه

در این پژوهش خرابی ماشین‌ها به صورت یونیفرم در نظرگرفته شده است. توزیع یونیفرم بی حافظه است، بدین معنی که اگر در توزیع یونیفرم، t واحد زمانی گذشته باشد و خرابی رخ نداده باشد، احتمال این‌که در s واحد زمانی دیگر خرابی رخ ندهد برابر است با احتمال این که از لحظه‌ی صفر تا لحظه‌ی s، خرابی رخ ندهد.

در این بخش، تأثیر افزایش زمان بین خرابی ماشین‌ها به تفکیک، بر میانگین هزینه‌ی کل مدل بهینه بررسی می‌شود. سپس مشخص می‌شود که افزایش زمان بین خرابی کدام نوع از ماشین‌ها بیشترین تأثیر را برکاهش میانگین هزینه‌ی کل دارد. به این منظور، زمان بین خرابی ماشین‌ها به طور مستقل ۶۰٪ افزایش داده شده است.

هرچه فاصله‌ی بین خرابی ماشین‌ها بیشتر باشد تعداد دفعات خرابی کم‌تر شده و تولید به موقع انجام می‌شود و به میزان بیشتری در هر دوره کارخانه تولید می‌کند؛ در نتیجه احتمال مواجهه با کمبود یا رد تقاضا سفارش تولید توسط کارخانه کم‌تر می‌شود. به تبع آن، هزینه‌ی نگهداری و کمبود از نوع فروش از دست رفته کم‌تر می‌شود. تغییرات میانگین هزینه‌ی کل در ماشین‌های نوع ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۳/۵٪ کاهش، ۶/۰٪ کاهش و کاهش ۱/۰۷٪ برای ماشین‌های نوع سوم هست. لذا از جداول فوق می‌توان نتیجه گرفت که تعداد دفعات خرابی ماشین نوع اول بیشترین تأثیر را در تغییر میانگین هزینه‌ی کل دارد. به همین علت، برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای این ماشین حائزاهمیت است و جلوگیری از خرابی پی در پی می‌تواند درکاهش میانگین هزینه‌ی کل بسیار مؤثر باشد. به عنوان نتیجه‌گیری کلی از این تحلیل حساسیت می‌توان گفت، برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر روی ماشین‌آلات نهایی خط تولید می‌تواند درکاهش هزینه‌های سیستم بسیار مؤثر باشد.

۲.۴. آنالیز حساسیت نسبت به تقاضا

در این قسمت، حساسیت مدل نسبت به تقاضا بررسی شده و تعیین می‌شود که مقادیر مختلف تقاضا به چه میزان روی جواب بهینه تأثیرگذار است. به این منظور ۳۰٪ به تقاضای هرکدام از محصول ۱ تا ۶ نسبت به سناریوی بهینه افزایش داده خواهد شد و مدل به ازای این تقاضا اجرا می‌شود. نتایج حاصل در جدول ۹ آمده است.

همان‌طورکه در جدول ۱۰ مشخص است با افزایش نرخ تقاضا، موجودی انبارها و درنتیجه هزینه‌ی انبارداری کاهش پیدا می‌کند. باکاهش موجودی انبار تعداد مشتری بیشتری از دست می‌رود؛ در نتیجه هزینه‌های مشتری از دست رفته افزایش می‌یابد. پس انبارها سفارش‌های بیشتری به کارخانجات جهت تولید محصول می‌دهند که در نتیجه باعث افزایش نرخ تولید شده که باعث کاهش هزینه‌ی خواب ماشین‌آلات شده و با توجه به افزایش تولید که موجب مصرف بیشتر مواد اولیه درکارخانجات است، شاهد افزایش هزینه‌ی کمبود ماده‌ی خام درکارخانجات هستیم. در آخر هم با توجه به افزایش سفارش انبارها به کارخانجات، شاهد افزایش هزینه‌های حمل و نقل خواهیم بود. درکل اطلاعاتی که این جدول به ما می‌دهد این است که به ترتیب محصول اول، چهارم و دوم بیشترین تأثیر را در هزینه‌های کل دارند.

جدول ۹. تغییرات میانگین هزینه‌ی کل با تغییر در نرخ تقاضای هر محصول.

میانگین هزینه‌ها تعداد مشتری‌های از دست رفته	سناریوی بهینه با اعمال مقادیر اولیه	تغییر سناریو بهینه در محصول ۱	تغییر سناریو بهینه در محصول ۲	تغییر سناریو بهینه در محصول ۳	تغییر سناریو بهینه در محصول ۴	تغییر سناریو بهینه در محصول ۵	تغییر سناریو بهینه در محصول ۶
هزینه‌های حمل‌ونقل	۴۰۱۵۷۵۸	۴۰۴۴۹۴۴	۴۱۵۴۲۳۴	۴۱۹۰۱۹۶	۴۲۳۸۸۶۸	۳۹۰۷۱۶۶	۳۸۸۹۴۵۴
هزینه‌ی نگهداری مواد اولیه	۱۶۷۲۷۸۷۸	۱۶۴۱۲۱۹۸	۱۷۳۴۶۳۸۷	۱۶۴۷۶۹۴۹	۱۶۵۸۱۵۹۰	۱۷۱۷۸۹۷۷	۱۵۶۶۵۰۳۷
هزینه‌ی نگهداری محصولات در انبارهای خرده‌فروشی	۸۲۰۴۱۵۰۲	۸۴۵۰۴۸۹۷	۸۵۷۵۶۹۳۲	۸۶۷۵۹۴۷۱	۸۸۶۰۷۲۷۳	۸۱۲۳۵۶۷۷	۸۴۸۸۴۲۹۵
هزینه‌ی کل مشتری از دست رفته	۴۵۷۶۴۱۳	۴۸۹۶۴۵۴	۷۰۸۲۳۵۹	۵۲۳۱۵۴۵	۸۲۰۱۴۰۲	۶۰۸۷۰۱۸	۴۸۱۷۵۸۳
هزینه‌ی بیکاری ماشین‌آلات	۲۳۵۸۸۶۲	۲۳۳۷۶۷۶	۲۳۵۸۵۰۹	۲۳۳۶۳۴۷	۲۳۳۱۳۹۱	۲۳۷۸۱۸۸	۲۳۵۳۶۳۶
هزینه‌ی کمبود مواد اولیه	۵۲۳۷۳۷۹	۴۰۹۲۱۱۸	۸۵۱۷۸۳۸	۷۳۵۱۱۳۵	۸۷۰۰۷۲۸	۱۱۸۲۱۵۳۶	۵۵۹۰۸۰۹
هزینه‌ی کل	۱۱۶۷۴۸۸۷	۱۱۸۱۱۳۳۴	۱۲۷۰۳۴۸۷	۱۲۴۱۸۹۵۳	۱۳۰۵۵۱۰۸	۱۲۴۳۹۴۵۸	۱۱۹۰۴۲۵۴
درصد تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به سناریوی بهینه	-	٪۱۱/۳۷	٪۸/۷۷	٪۶/۳۴	٪۱۱/۷۸	٪۶/۵۱	٪۱/۹
تعداد تقاضای وارد شده به روابط بین انباری	۱۱	۱۴	۱۹	۵	۷/۸	۱۱	۴/۲
تعداد مشتری از دست رفته	۲۵	۳۵	۳۶	۲۲	۲۸/۶	۲۴/۲	۲۰/۴

جدول ۱۰. تغییرات هزینه با افزایش پارامتر توزیع خرابی ماشین‌های نوع ۱، ۲ و ۳.

میانگین هزینه‌ها و تعداد مشتری‌های از دست رفته	سناریوی بهینه با اعمال مقادیر اولیه	سناریوی بهینه‌ی تغییر پارامتر توزیع خرابی ماشین نوع ۱	سناریوی بهینه‌ی تغییر پارامتر توزیع خرابی ماشین نوع ۲	سناریوی بهینه‌ی تغییر پارامتر توزیع خرابی ماشین نوع ۳
هزینه‌های حمل و نقل	۴۰۱۵۷۵۸	۳۸۶۸۴۵۰	۳۹۳۹۸۹۶	۳۹۷۰۹۵۲
هزینه‌ی نگهداری مواد اولیه	۱۶۷۲۷۸۷۸	۱۴۷۷۱۵۸۶	۱۶۳۰۳۲۵۶	۱۶۹۳۳۲۶۳
هزینه‌ی نگهداری محصولات در انبارهای خرده‌فروشی	۸۲۰۴۱۵۰۲	۸۱۶۵۲۴۷۱	۸۲۳۴۶۳۶۰	۸۰۳۵۰۸۶۶
هزینه‌ی کل مشتری از دست رفته	۴۵۷۶۴۱۳	۳۱۵۲۶۹۹	۴۰۸۴۲۲۴	۳۷۱۷۱۷۶
هزینه‌ی بیکاری ماشین‌آلات	۲۳۵۸۸۶۲	۲۳۶۱۸۵۰	۲۳۵۸۵۵۴	۲۳۸۶۵۱۰
هزینه‌ی کمبود مواد اولیه	۵۲۳۷۳۷۹	۵۰۳۶۵۳۳	۵۱۳۱۳۶۹	۶۴۲۹۶۶۱
هزینه‌ی کل	۱۱۶۷۸۴۸۸۷	۱۱۲۶۵۲۱۲۱	۱۱۵۹۸۰۳۶۹	۱۱۵۵۲۵۳۴۹
تعداد تقاضای وارد شده به روابط بین انباری	۱۱	۳/۲	۵۶	۱۲
تعداد مشتری از دست رفته	۲۵	۱۶	۱۷/۸	۱۷/۲

جدول ۱۱. تغییرات میانگین هزینه‌ی کل با حذف رابطه بین انباری.

میانگین هزینه‌ها و تعداد مشتری‌های از دست رفته	سناریوی بهینه	سناریوی بهینه با تغییر در پارامتر توزیع خرابی
هزینه‌ی حمل‌ونقل	۴۰۱۵۷۵۸	saja۳۹۵۰۹۰۴
هزینه‌ی نگهداری مواد اولیه	۱۶۷۲۷۸۷۸	۱۶۷۸۹۸۷۳
هزینه‌ی نگهداری محصولات در انبارهای خرده‌فروشی	۸۲۰۴۱۵۰۲	۸۴۹۸۳۳۱۰
هزینه‌ی کل مشتری از دست رفته	۴۵۷۶۴۱۳	۵۸۲۴۷۴۱
هزینه‌ی بیکاری ماشین‌آلات	۲۳۵۸۸۶۲	۲۳۶۷۱۳۴
هزینه‌ی کمبود مواد اولیه	۵۲۳۷۳۷۹	۶۷۱۳۱۶۶
هزینه‌ی کل	۱۱۶۷۸۴۸۸۷	۱۲۲۱۵۰۰۴۹
تعداد تقاضای وارد شده به روابط بین انباری	۱۱	۰
تعداد مشتری از دست رفته	۲۵	۲۸

۳.۴. آنالیز حساسیت رابطه بین انباری

در این قسمت تأثیر رابطه بین انباری را بررسی می‌کنیم، که یکی از نوآوری‌های پژوهش است. در این قسمت نسبت به سناریوی بهینه، رابطه‌ی بین انباری را حذف می‌کنیم و میزان تأثیرش را در مدل بررسی می‌کنیم.

همان‌طورکه در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود در نظرگرفتن این سیاست باعث کاهش هزینه‌های کل به میزان ۵/۳۶۵/۱۶۲ واحد پولی است و در واقع تأثیر ۴٪ در مدل را دارد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی طراحی شد و با هدف پی بردن به رفتار سیستم، آزمایش‌هایی انجام شد. با استفاده از قابلیت‌های بالای نرم‌افزار به کاربرده شده، که حالت‌های دنیای واقعی را بهتر ترسیم می‌کند، سعی شد با لحاظ کردن عدم قطعیت بیشتر، نتیجه‌های بهتری از دنیای بیرون حاصل شود. بر اساس مطالعه‌ها و پژوهش‌های انجام شده در این تحقیق، نتایج حاصل از آزمایش عبارت است از:

- در این الگوریتم، امکان تجزیه و تحلیل عوامل تأثیرگذار در تمام زنجیره‌ی تأمین در حضور عوامل عدم قطعیت وجود دارد.
- مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و ذهنی صحت مدل شبیه‌سازی شده را مورد تأئید قرار می‌دهد.
- با توجه به مثال عددی که از مطالعه‌ی موردی استخراج شده در مقایسه با حالت بهینه شده، واحد هزینه‌های سیستم ۶۴ میلیون واحد پولی کاهش یافته است.
- مدل موجودی ماده‌ی خام lot for lot در مقایسه با S,s نتیجه‌ی بهتری داشت و باعث کاهش هزینه‌های نگهداری و کمبود در سیستم شد.
- بالاترین حساسیت نسبت به ماشین نوع ۱ شناسایی شد؛ این نوع ماشین‌ها باید در اولویت بالاتری نسبت به سایر ماشین‌های دیگر جهت تعمیر و نگهداری پیشگیرانه قرار بگیرند.
- در این مقاله نشان دادیم که در نظرگرفتن سرعت تولید متغیر ماشین‌ها به صورت انعطاف‌پذیر باعث کاهش تعداد ماشین‌ها و همچنین کاهش هزینه‌های ثابت خرید ماشین‌ها، تعمیر و نگهداری و بیکاری ماشین‌ها خواهد شد؛ چنان که در این مطالعه باعث کاهش ۳ دستگاه ماشین در مجموع دو کارخانه شده است.
- این الگوریتم در صورت افزایش ابعاد مسئله امکان حل مسائل پیچیده‌تر را دارد.

از جمله مواردی که می‌توان برای تحقیقات آتی مد نظر قرار داد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- این مطالعه می‌تواند با در نظرگرفتن هزینه‌های تولید، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و هزینه‌های مربوط به نیروی انسانی و غیره انجام شود.
- در این مدل نرخ تقاضا می‌تواند دوره‌یی در نظرگرفته شود.
- برای افزایش نرخ تقاضای مشتریان، تبلیغات به مدل اضافه شود.

۱٫۵سانت۱٫۰سانت

پانوشت‌ها

1. SMEs
2. ARENA
3. Aptquest

منابع (References)

1. Taebok Kim, Christoph H. Glock., "Production planning for a two-stage production system with multiple paallel machines and variable production rates", *International Journal of Production Economics* , **196**, pp. 284-292 (2018).
2. Bagchi, P.K., Ha, B.C., Skjoett-Larsen, T. and Soerensen, L.B. "Supply chain integration: a European surrey", *The International Journal of Logistics Management*, **16**2 pp. 275-294 (2005).
3. Nikolopoulou, A. and Ierapetritou, M.G. "Hybrid simulation-based optimization approach for supply chain management", *Computer and Chemical Engineering*, **47**1, pp. 183-193 (2012).
4. Miranzadeh, A., Sajadi, S.M. and Tavakoli, M.M., "Simulation of a single product supply chain model with ARENA", *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, **19**1, pp. 18-33 (2015).
5. Aghabozorgi, N., Alinaghian, M. and Sajadi, S.M. "A new robust model for location – inventory in three echelon supply chain with uncertain demand in small and medium business enterprises", *Int. J. Process Management and Benchmarking*, **7**1, pp. 38-58 (2017).
6. Kravchenko, S.A., Werner, F. "Parallel machine problems with equal processing times: a survey", *Journal of Scheduling*, **14** (5), pp. 435-444 (2011).
7. Hatami-Marbini, A., Mojtaba Sajadi, S., Malekpour, H. "Optimal control and simulation
for production planning of network failure-prone manufacturing systems with perishable goods", *Computers* & **Industrial Engineering** (2020).
8. Christoph H. Glock , Eric H. Grosse , "The impact of controllable production rates on the performance of inventory systems: A systematic review of the literature", *European Journal of Operational Research*, **288** , pp.703-720 (2021).
9. Glock, C.H. "Batch sizing with controllable production rates", *International Journal of Production Research*, **48** (20), pp. 5925-5942 (2010).
10. Glock, C.H. "Batch sizing with controllable production rates in a multi-stage production system", *International Journal of Production Research*, **49**(20), pp. 6017-6039 (2011).
11. Michiel A. J. uit het Broek, Ruud H. Teunter, Bram de Jonge, Jasper Veldman, Nicky D. Van Foreest; "Condition-based production planning: adjusting production rates to balance output and failure risk", *Manufacturing & Service Operations Management* (2019).
12. Asif Iqbal Malik , Byung Soo Kim. "A multi-constrained supply chain model with optimal production rate in relation to quality of products under stochastic fuzzy demand", *Computers & Industrial Engineering*, **149**, November 2020, 106814 (2020).
13. Farzam rad. M. and Sajadi. S. Hosseinzadeh Kashan, M. "Determination of optimal production rate in stochastic manufacturing systems by simulation optimisation approach", *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, **20**(3), pp.306-322 (2015).
14. Tahir Ekin. "Integrated maintenance and production planning with endogenous uncertain yield", *Reliability Engineering & System Safety*, **179**, November 2018, pp. 52-61 (2017).
15. Polotski, V., Kenne, J.-P. and Gharbib, A. " Joint production and maintenance optimization in flexible hybrid manufacturing–remanufacturing systems under age-dependent deterioration", *International Journal of Production Economics*, **216**, October 2019 pp. 239-254 (2019).
16. Alinezhad, Amini, A. Kazemi, A. "Supplier selection by combination of ahp method and presenting a model for order allocation to selected suppliers", *Industrial engineering & managment*, **32.1**, Issue 1.1, Summer and Autumn 2016, pp. 89-98 (2016).
17. Yari gholi, H. and Kazemi, A. "Presenting a multi objective model for supplier selection with considering discount, delay payment and minimum distance", *Industrial engineering & management*, **32.1**, Issue 2.2, Winter and Spring 2017, pp. 47-56 (2017).
18. Hashemi Dehaghi, Z., Sajadi, S.M. and Nili Ahmadabadi, M. "Determine the optimal order quantities in lot sizing models regarding minimum order quantity with simulation", *International Journal of Engineering Sciences*, **2**(8) August 2013, pp. 399-403 (2011).
19. Pal, B., Sana, S.S., and Chaudhuri, K. "A three layer multi-item production–inventory model for multiple suppliers and retailers", *Economic Modelling*, **29**6, PP. 2704-2710 (2012).
20. Glock, C.H., Jaber, M.Y. and Searcy, C. "Sustainability strategies in an EPQ model with price- and quality-sensitive demand" , *International Journal of Logistics Management*, **23** (3), pp. 340-359 (2012).
21. Mohamad Y. Jaber , Christoph H. Glock & Ahmed M.A. El Saadany "Supply chain coordination with emissions reduction incentives" , *International Journal of Production Research*, **51:1**, pp. 69-82 (2013).
22. Zanoni, S., Bettoni, L. and Glock, C.H. "Energy implications in a two-stage production system with controllable production rates" , *International Journal of Production Economics*, **149** (3), pp. 164-171 (2014).
23. Mohammadbagher Afshar, Ali Bozorgi-Amiri, Seyed Mojtaba Sajadi, Fariborz Jolai. "A multi-objective environmental hedging Point policy with customer satisfaction criteria", *Journal of Cleaner Production* **179**, pp. 478e494 (2018).
24. Rouzbeh Aiassi, Seyed Mojtaba Sajadi , Seyyed Mohammad Hadji Molana, Ali Zamani Babgohari. "Designing a stochastic multi-objective simulation-based optimization model for sales and operations planning in built-to-order environment with uncertain distant outsourcing",
Simulation Modelling Practice and Theory (2020).
25. Taha-HosseinHejazi, " State-dependent resource reallocation plan for health care systems: A simulation optimization approach", *Computers & Industrial Engineering*, **159**, September 2021, 107502 (2021).