مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۲)
دوره‌ی ۱ - ۲۹، شماره‌ی ۲، ص. ۷۳-۸۱

Original Article

شبیه‌سازی زنجیره‌ی تأمین چندسطحی تحت سیستم به‌هنگام، و بهینه‌سازی اهداف آن

سیدکمال چهارسوقی * **(دانشیار)**
آرمان ساجدی‌نژاد (پژوهشگر فرا دکتری)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس

تعیین سطح موجودی‌ها در طول زنجیره‌ی تأمین، به‌منظور نیل به اهداف متنوع زنجیره ــ نظیر رسیدن به سطح مطلوب پاسخ‌گویی[1] و کارایی[2] ــ کاری دشوار به نظر می‌رسد. شبیه‌سازی ابزاری است برای حل مسائل پیچیده‌یی که مدل‌های ریاضی قادر به حل آن‌ها نیستند. در این نوشتار زنجیره‌ی تأمین با الگوی تولید به‌هنگام[3] و ترکیب شبیه‌سازی با بهینه‌یابی متغیرهای زنجیره مدل می‌شود. متغیرهای مدل شبیه‌سازی زنجیره‌ی تأمین عبارت است از: مقادیر دو نوع کانبان کششی و تولیدی برای تعیین سطح موجودی زنجیره، و میزان سایز دسته[4] برای هر مرحله از زنجیره‌ی تأمین. با استفاده از تکنیک فرابتکاری، مقادیر این متغیرها چنان تعیین می‌شوند که اهدافی مانند کاهش دیرکرد در تحویل سفارشات و کاهش سطح موجودی در زنجیره‌ی تأمین، به سمت بهینه‌شدن سوق داده می‌شوند.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی، بهینه‌یابی، زنجیره‌ی تأمین، سیستم به‌هنگام، کانبان.

skch@modares.ac.ir
sajedinejad@modares.ac.ir

۱. مقدمه

با پیشرفت‌های فناورانه، گسترش بازارها و افزایش تعداد رقبای مطرح، حفظ رقابت صنایع تولیدی و خدماتی مستلزم بهبود سریع فرایندهای داخلی آن‌هاست.

مدیریت زنجیره‌ی تأمین[5] نقش مهمی در محیط‌های مختلف کسب و کار ایفا می‌کند. تأکید ادبیات موضوع بر این است که مفاهیم ظاهراً ساده‌یی چون «موجودی کم» و تحویل یا عرضه‌ی به‌هنگام و... اثرات داخلی گسترده‌یی بر شرکت و سرتاسر زنجیره‌ی تأمین دارد. طراحی مدل زنجیره‌ی تأمین براساس سیستم به‌هنگام، می‌تواند یک مدل موفق در زنجیره‌ی تأمین باشد.[1]

در سیستم‌های به‌هنگام، استفاده از کانبان به عنوان ابزاری برای هماهنگی اطلاعات و جریان مواد جریان دارد. به‌علت وجود سفارشات احتمالی و غیرقطعی در زنجیره‌ی تأمین، و نیز تعداد بسیار زیاد متغیرها برای تصمیم‌گیری در زنجیره، استفاده از ابزار شبیه‌سازی و ترکیب آن با روش‌های بهینه‌سازی ضرورت می‌یابد. در این نوشتار مدل زنجیره‌ی تأمین به‌هنگام و بهینه‌سازی متغیرهای آن ــ در راستای کاهش سطح موجودی‌های و رسیدن به پاسخ‌دهی مطلوب به سفارشات ــ شبیه‌سازی شد. از متغیرهای مدل به دو نوع کانبان تولیدی و کششی می‌توان اشاره کرد که به‌ترتیب مقادیر موجودی در هر مرحله از زنجیره و بین مراحل زنجیره را کنترل می‌کنند.

از دیگر متغیرهای مدل در این نوشتار، مقدار سایز دسته کالاهای انتقالی است که در ادبیات مدل‌سازی زنجیره‌ی تأمین، به‌درستی به آن پرداخته نشده است. همچنین الگوی بهینه‌سازی ارائه‌شده در این نوشتار، در ارتباط با مدل شبیه‌سازی بوده و به‌طور همزمان دو تابع هدف را بهینه می‌کند.

در بخش اولِ این نوشتار، ادبیات زنجیره‌ی تأمین و روش کنترل موجودی به‌هنگام مرور می‌شود. در بخش بعدی، الگوی مدل به‌هنگام زنجیره‌ی تأمین ارائه شده و پارامترها و متغیرهای مدل بیان می‌شوند. در ادامه، ضمن ارائه‌ی مدل شبیه‌سازی و مدل بهینه‌سازی، نتایج این مدل‌ها برای مدل فرضی زنجیره‌ی تأمین بیان می‌شود.

۲. مرور ادبیات

زنجیره‌ی تأمین به‌عنوان یکی از پراستفاده‌ترین راهکارهای عملیاتی برای رقابت‌های سازمانی در اوایل قرن ۲۱ شناخته می‌شود.[2] مدیریت زنجیره‌ی تأمین مجموعه‌یی از دیدگاه‌هاست که برای یکپارچه‌سازی کارایی عرضه‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و انبارها به‌کار می‌رود، طوری که کالاها به میزان مناسب، در زمان و مکان مناسب تولید و توزیع شوند. تمامی این دیدگاه‌ها به‌منظور کمینه‌سازی هزینه‌ها در سرتاسر زنجیره، در حالی که نیازهای خدماتی تأمین می‌شوند، در نظر گرفته می‌شود.[3]

تولید ناب و چابک در زنجیره‌ی تأمین متکی است بر تولید با کم‌ترین هزینه و در مواقع لزوم، و نیز تولید برای ارضای نیاز مشتریان مانند افزایش سرعت تحویل و کاهش تأخیر در تحویل سفارشات. زنجیره‌ی تأمین، به این ترتیب می‌تواند به دو هدفِ حفظ مشتریان قبلی و افزوده شدن مشتریان جدید دست یابد.[1]

در حال حاضر ترکیب مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی یکی از متدهای مورد

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۱/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۰/۱۰/۴، پذیرش ۱۳۹۰/۱۱/۲۳.

استفاده در زمینه‌ی برنامه‌ریزی‌های زنجیره‌ی تأمین است که توسط محققین دنبال می‌شود. مدل ریاضی به‌دنبال یافتن جواب بهینه‌ی متغیرهای تصمیم‌گیری با توجه به اهداف زنجیره است. حال آن که به‌دلیل مفروضات مدل، عموماً جواب به‌دست آمده محدود است. اما مدل‌های شبیه‌سازی که به‌راحتی می‌توانند تصادفی‌بودن متغیرها را به هر میزان مورد نیاز در نظر بگیرند، در دست‌یابی به رفتار سیستم واقعی توان‌مندند.[۴و۵]

استفاده از ترکیب شبیه‌سازی و بهینه‌سازی را می‌توان به حدود ۱۰ سال پیش نسبت داد. از فعالیت‌هایی که در آن زمان انجام شد، می‌توان به بهینه‌سازی تعداد جرثقیل‌ها و دیگر تجهیزات در یک واحد صنعتی اشاره کرد. هرچند تعداد متغیرهای مسئله در مقایسه با مسائل زنجیره‌ی تأمین بسیارکم به نظر می‌رسید، اما استفاده از الگوریتم ژنتیک در این نوشتار نتایج بسیار خوبی در بر داشت.[۶]

در سال ۲۰۰۳، درمورد کاربرد شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آثاری در مقالات دیده شد. در این مطالعه، با بررسی زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی، موجودی زنجیره با یک محصول مورد بررسی قرار گرفت. صرف نظر از مقدار سایز دسته‌ی محصولات بین کارخانجات، این مدل بیشتر به مدلی برای سطوح تولیدی در یک کارخانه شباهت دارد.[۷]

در سال ۲۰۰۴، مباحث زمان‌بندی تولید به‌منظور در اختیار داشتن موجودی اطمینان زنجیره‌ی تأمین در سیستم شبیه‌سازی، مدل شد. هدف این مدل، کاهش هزینه‌های موجودی در زنجیره‌ی تأمین بود. این مدل با استفاده از مفاهیم مونت‌کارلو، و با تکنیک ابتکاری محققین بهینه‌سازی شد.[۸]

در سال ۲۰۰۵، اولین شبیه‌سازی با هدف‌های چندگانه در زنجیره‌ی تأمین مورد بررسی قرار گرفت. در این فرایند سیاست بازرسی موجودی در بازه‌های ثابت زمانی مدل، و با الگوریتم ژنتیک ترکیب شد. در این مطالعه، سایز دسته‌ی محصولات در سطوح زنجیره در نظر گرفته نشده بود.[۹]

از آن پس، روش‌های متعددی مانند روش‌های ریاضی و روش‌های ابتکاری، برای حل مدل‌های احتمالی با توابع هدف چندگانه مطرح شد.[۱۰] شبیه‌سازی، نظریه‌ی بازی‌ها[۶]، منطق‌های فازی و... از دیگر روش‌های حل مدل‌های احتمالی با توابع هدف چندگانه‌اند.[۱۱]

در سال ۲۰۰۷، مسیریابی در زنجیره‌ی تأمین با استفاده از ترکیبِ شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مدل شد. در این فعالیت با وجود محدودیت‌های خاص، مدل‌سازی با هدف کمینه‌کردن طی مسیر انجام شده و مدل با الگوریتم ابتکاری حل شد.[۱۲]

از آنجا که سیستم‌های تولید و پخش نیز جزء مسائل پیچیده در زنجیره‌ی تأمین به‌شمار می‌آیند، در سال ۲۰۰۸، از طریق شبیه‌سازی چارچوبی ارائه شد که مسائل تولید و پخش را به‌طور هم‌زمان پوشش می‌داد. در این نوشتار از روشی ابتکاری در بهینه‌سازی استفاده شد که با ترکیب آن با شبیه‌سازی، مقدار سایز دسته و تخصیص کامیون‌های حمل محصولات را به سمت بهینه‌گی پیش می‌برد. در این نمونه، موجودی انبارهای کارخانجات مورد بررسی قرار نگرفته بود. تولید و پخش محصولات در این مدل در بازه زمانی کوتاهی مدل شده بود.[۱۳]

در سال ۲۰۱۰، از شبیه‌سازی و یک الگوریتم ترکیبی[۷] برای زنجیره‌ی تأمین چهارسطحی استفاده شد. هدف این مسئله، طراحی ساختار زنجیره‌ی تأمین و جایگذاری مراکز پخش در زنجیره، بود.[۱۴]

در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۱، مدل ریاضی زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی سریالی ایجاد شده بود که تأثیر حجم سفارشات و نرخ تولید را در زنجیره مورد سنجش قرار داده بود. این مدل بدون پرداختن به هدف کاهش دیرکرد در تحویل سفارشات، فقط در جهت افزایش میانگین سود بنا شده بود.[۱۵]

۳. مدل‌سازی زنجیره با الگوی به‌هنگام

سیستم مکمل تولید تویوتا به‌نام تولید به‌هنگام یا سیستم تولید تویوتا، همچنان به‌عنوان تولید ناب مطرح می‌شود.[۱] در پاسخ به تقاضای مشتریان، سیستم تولیدی به‌هنگام به‌دنبال کوتاه‌کردن زمان فرایند تولید و کمک به بازگشت سریع سرمایه است.[۱۶] برای پیاده‌سازی موثرتر سیستم تولید به‌هنگام، لازم است همه‌ی اعضای زنجیره توسط یک شبکه‌ی اطلاع‌رسانی الکترونیک با یکدیگر مرتبط شوند. امروزه، فرایندها رایانه‌یی شده و فرم‌های تحویل به‌صورت کانبان‌های الکترونیکیِ متصل به قطعاتِ حاوی اطلاعات مربوطه‌توزیع می‌شوند.[۱۷و۱۸] کاهش هزینه و تحویل به‌موقع از مهم‌ترین عوامل سیستم‌های به‌هنگام به‌شمار می‌رود.[۱۹]

سیستم زنجیره‌ی تأمین به‌هنگام، محصول را به‌میزان صحیح تولید، و به مکان‌های صحیح و در زمان‌های مناسب توزیع می‌کند. به حداقل رساندن هزینه‌ی کل سیستم و نیز جلب رضایت مشتری از سطح خدمات، از جمله اهداف این سیستم هستند.[۲۰]

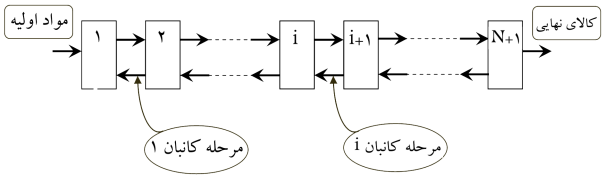
مدل زنجیره‌ی تأمین به‌هنگام و استفاده ازکانبان در زنجیره‌ی تأمین چند مرحله‌یی سریالی، در این تحقیق شکل گرفت. مدل مفهومی زنجیره‌ی تأمین با الگوی به‌هنگام در شکل ۱ آمده است. در این مدل، تقاضا به‌صورت اتفاقی و زمان فرایند هرکارخانه به‌طور قطعی فرض شده است.

برای پیاده‌سازی فلسفه‌ی به‌هنگام، استفاده ازکانبان به‌عنوان یک سازوکارکارآمد عملیاتی معرفی شده است. به این ترتیب، سازوکارکانبان تضمین می‌کند که سازمان‌ها برای اجرای سیستم‌های زنجیره‌ی تأمین خود از سیاست به‌هنگام پیروی کنند.[۲۱] یک کانبان معمولاً شامل اطلاعاتی مانند شماره‌ی قطعه، شرح، بار واحد (کمیت در هر ظرف)، محل انبار، روند پایان و... است. نقش کانبان در یک سیستم زنجیره‌یی عرضه، نه‌تنها به‌عنوان یک حامل اطلاعات بلکه به‌عنوان حامل مواد (یا حمل‌ونقل) نیز هست. اگر سیستم زنجیره‌ی تأمین را به‌صورت شکل ۱ در نظر بگیریم و مرحله‌ی i و $i+1$ را به‌عنوان نمایش جدا کنیم (شکل ۲)، شرایط حاصله عبارت خواهد بود از:

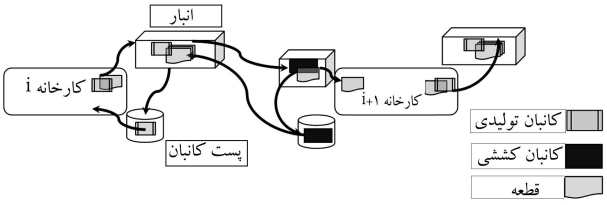
الف) هر مرحله از زنجیره‌ی تأمین ممکن است یک شهرستان، کارگاه، مغازه و یا یک کارخانه باشد؛

ب) توزیع آماری تقاضای سفارشات، مشخص است؛

ج) بیشترین میزان تولید در هرکارخانه معلوم و بزرگ‌تر از میانگین توزیع تقاضاست؛



شکل ۱. تصویر کلی کانبان در زنجیره‌ی تأمین سریالی.



شکل ۲. دوکارخانه سریالی در زنجیره با سیستم ارتباط کانبان.

د) مقدار کل کانبان‌های تولید[8] و کششی[9] در هر مرحله در طول مدت زمان ثابت است؛

ه) زمان انتقال محصولات بین واحدهای تولیدی[10] مشخص است؛

و) کانبان‌های کششی و تولیدی برای تعیین موجودی اطمینان و نیز مقدار سایز دسته‌ی بهینه، توسط مدل کشف می‌شود؛

ز) هدف کاهش موجودی و کاهش دیرکرد در تحویل سفارشات است.

نمادهای مورد استفاده برای تشریح مدل نیز عبارت‌اند از:

n: تعداد مراحل.

i: شماره‌ی مرحله (از ۱ تا n).

L_i: زمان انتظار قطعات در مرحله‌ی i.

M_i: تعداد کانبان تولیدی در مرحله‌ی i.

N_i: تعداد کانبان کششی (سفارش) در مرحله‌ی i.

C_i: ظرفیت تولید در مرحله‌ی j.

$D(k)$: تقاضا در دوره‌ی تناوبی k.

$B_i(k)$: تقاضای باقی‌مانده از دوره‌های زمانی قبل در مرحله‌ی i، در شروع دوره‌ی تناوبی k.

$I_i(k)$: سطح موجودی در مرحله‌ی j، در شروع دوره‌ی تناوبی k.

$J_i(k)$: تعداد کانبان‌های موجود در پست تولید، در مرحله‌ی j در شروع دوره‌ی تناوبی k.

$P_i(k)$: میزان تولید در مرحله‌ی j در دوره‌ی تناوبی k.

$Q_i(k)$: مقدار تحویل قطعه در مرحله‌ی j در دوره‌ی تناوبی k.

Qw_i: سایز دسته‌ی تحویلی.

Km_i: تعداد کانبان تولیدی در هرکارخانه.

Kn_i: تعداد کانبان کششی بین هر دو کارخانه.

T: کل زمان مدل‌سازی.

Tw: زمان لازم برای آماده‌سازی مدل.

De: مجموع کمبود سفارشات تحویلی در انتهای زنجیره‌ی تأمین در دوره‌ی شبیه‌سازی.

A: مجموع موجودی در سطوح زنجیره در دوره‌ی شبیه‌سازی.

قطعات مورد استفاده در مرحله‌ی i و در زمان k، به مرحله‌ی $(i-1)$، در آغاز دوره‌ی $(k+1)$ انتقال یافته و در آغاز دوره‌ی $(k+L_i+1)$ تحویل داده می‌شود. با فرض استقلال تقاضا در آغاز هر مرحله، با توزیع احتمالی با میانگین D، سفارش قطعات مورد نیاز به‌ترتیب از مرحله‌ی i به $i-1$ می‌رسد. تقاضای اضافی محصولات یا قطعات، در صورتی که از محصولات به‌اندازه‌ی سفارش داده شده در انبار موجود نباشد، در هر مرحله انباشته می‌شود. ظرفیت حامل محصولات (کانبان) در هر مرحله، Qw_i در نظر گرفته می‌شود.

L_i زمان انتظار تأمین‌کننده و Kn_i تعداد کانبان‌های تأمین‌کننده است. همچنین $\frac{P_i(k-1)}{Qw_{i-1}}$ تعداد کانبان‌هایی است که در آغاز مرحله‌ی k به تولیدکننده می‌رسد. تعداد قطعه‌ی تحویلی در هر مرحله، به میزان موجودی، میزان تولید در مرحله‌ی زمانی قبل، سفارشات عقب افتاده و میزان تحویل در دوره‌های زمانی قبل بستگی دارد. بنابراین:

$$Q_i(k) = I_i(k) + \frac{P_i(k-1)}{Qw_{i-1}} + B_{i-1}(k) + \sum_{m=k-L_i+1}^{k-1} Q_{i-1}(m) \quad (1)$$

از آنجا که اختلاف سطح موجودی در ابتدای دوره‌ی $k+1$ با ابتدای دوره‌یk، همان تفاوت بین میزان تحویل در مرحله‌ی قبل از شروع دوره‌ی k و مقدار مصرف شده از محصولات نیمه‌ساخته در همان دوره است، داریم:

$$I_i(k+1) = I_i(k) + Q_{i-1}(k-L_i+1) - \frac{P_i(k)}{Qw_{i-1}} \quad (2)$$

و نیز چون در سیستم تولیدJIT، میزان تولید در هر مرحله کم‌ترین میزان سطح موجودی، مقدار سفارش و یا ظرفیت تولید است، داریم:

$$P_i(k) = \min(I_i(k) * Qw_{i-1}, J_i(k) * Qw_i, C_i) \quad (3)$$

تقاضای انباشته در مرحله‌ی i در آغاز دوره‌ی $k+1$ رخ می‌دهد. اگر مجموع تقاضای انباشته در آغاز دوره‌ی k و تقاضای مرحله‌ی بعدی، بیش از میزان تولید قطعات و سطح موجودی در مرحله‌ی k باشد، داریم:

$$B_i(k+1) = \max(0, B_i(k) + J_i(k) * Qw_i + P_{i+1}(k-1) - P_i(k) - Qw_i * Km_i) \quad (4)$$

از آنجا که تعداد کانبان تولیدی در پست کانبان در آغاز دوره‌ی $k+1$ کم‌ترین میزان M_i و تقاضای انباشته کل در آغاز دوره‌ی $k+1$ است، داریم:

$$J_i(k+1) = \min(K_m, \frac{B_i(k)}{Qw_i} + J_i(k) + \frac{P_{i+1}(k-1)}{Qw_i} - \frac{P_i(k)}{Qw_i}) \quad (5)$$

تابع هدف این مسئله، به دو تابع ۶ و ۷ تقسیم می‌شود:

$$\text{Minimize} \quad f = (f_1, f_2),$$

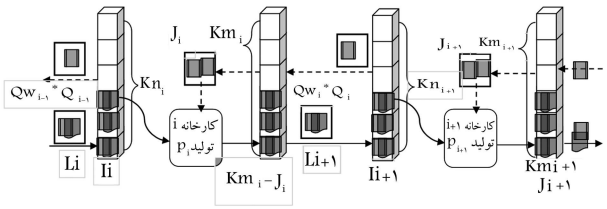
$$f_1 = A(Kn_i, Km_i, Qw_i) = \sum_{k=Tw}^{T} \sum_{i=1}^{n} (Km_i - J_i(k) + I_i(k)) \quad (6)$$

$$f_2 = De(Kn_i, Km_i, Qw_i) = \sum_{k=Tw}^{T} (\max(0, D(k) + B_n(k) - Km_n)) \quad (7)$$

تابع اول با توجه به سایز دسته‌ها و تعداد کانبان‌های تولیدی و کششی، مقدار کل موجودی زنجیره را براساس موجودی انبارهای قبل و بعد از هرکارخانه، در بازه زمانی آماده‌سازی تا تولید نهایی اندازه‌گیری می‌کند. تابع دوم دیرکرد در تحویل سفارشات در انتهای هر بازه زمانی را، با توجه به سفارشات آن دوره، سفارشات عقب افتاده و مقدار موجودی کنونی، محاسبه می‌کند.

۴. مدل شبیه‌سازی

مدل شبیه‌سازی براساس روابط ذکرشده و اهداف ۶ و ۷ طراحی می‌شود. موجودی در انبار قبل از هرکارخانه در رابطه‌ی ۲ و موجودی در انبار بعد از هرکارخانه، از کسر کانبان‌های تولیدی و رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید (شکل ۳). همچنین تولید در هر مرحله از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود. از روابط ۱ و ۴ در سایر روابط استفاده شده‌اند.



شکل ۳. مدل کلی زنجیره بر اساس سیستم به‌هنگام.

مدل اصلی برای زنجیره‌ی تأمین چهارسطحی طراحی شده و اعتبار مدل با مدل ساده‌ی سه‌سطحی موجود در ادبیات سنجیده می‌شود. مدل‌سازی زنجیره تحت نرم‌افزار ED نسخه‌ی ۸٫۱ و بهینه‌سازی توسط زبان برنامه‌نویسی 4D Script، تحت نرم‌افزار فوق انجام شده است.

برازندگی اول توسط انبارهای قبل و بعد از هرکارخانه که حاوی قطعات متصل به کانبان‌ها و تشکیل‌دهنده‌ی موجودی در حین فرایند[11] هستند، به‌دست می‌آید. برازندگی دوم در هنگام تحویل هر سفارش، براساس دیرکرد در تحویل آن به دست می‌آید.

۱.۴. حد بالای جواب‌های اولیه

برای ایجاد جواب‌های نسل‌های مختلف الگوریتم، بازه جواب‌های محتمل برای تولید در الگوریتم بر سرعت و حساسیت مدل تأثیرگذار است. در صورت زیادبودن بازه تولید جواب‌های اولیه و نیز جواب‌هایی که براساس جهش در الگوریتم تولید می‌شوند، فضای جواب بزرگ شده و ممکن است سرعت رسیدن به جواب بهینه‌ی مسئله کاهش یابد. در عین حال، چنانچه بازه جواب تا حد زیادی کوچک شود، احتمال از دست دادن جواب‌های متناسب بالا می‌رود. بنابراین در ابتدای فرایند، بازه جواب را بزرگ انتخاب کرده و حرکت مدل را به سمت جواب‌های خوب پایش می‌کنیم. بدین‌منظور حد بالای بازه جواب‌های اولیه را برای ظرفیت موجودی، از طریق تعداد کانبان و نیز اندازه‌ی سایز دسته‌های تولید، ۵۰۰ در نظر می‌گیریم.

در این حالت پس از چند نسل بهینه‌سازی، تعداد جواب‌های نخبه در هر نسل که دارای ژن‌های بالای ۱۰۰ هستند، کاهش می‌یابد و بعد از طی ۳۰۰ نسل، دیگر هیچ جوابی که شامل تعداد کانبان یا مقدار سایز دسته‌ی تولیدی بیشتر از ۱۰۰ باشد یافت نمی‌شود (جدول ۱).

جدول ۱. حد بالای مقادیر تصادفی کانبان‌های کششی و تولیدی و سایز دسته‌ها.

	تعداد ژن‌های بالای صد	تعداد ستون‌های دارای ژن بالای صد
۱	۸۷	۱۵
۲	۸۶	۱۵
۸	۷۵	۸
۳۲	۷۰	۷
۶۴	۶۰	۶
۱۷۶	۳۰	۳
۲۵۶	۹	۱
۳۰۰	۰	۰

بنابراین حد بالای ۱۰۰ را برای هر ژن در جواب‌های اولیه (و نیز در عملیات جهش) انتخاب می‌کنیم و اطمینان حاصل می‌کنیم که الگوریتم، جواب‌های دورتر از حد انتظار را تولید نخواهد کرد.

۲.۴. زمان اجرای شبیه‌سازی[12] برای هر عضو در هر نسل (T)

برای یافتن زمان پایان شبیه‌سازی هر کروموزوم، شبیه‌سازی را تا رسیدن سیستم به حالت تعادل، برای کروموزوم‌های یکسان آزمودیم تا به زمانی واحدی دست یابیم. این حالت زمانی ایجاد می‌شود که حدود تناسب به دست آمده برای یک کروموزوم، یکسان و تأثیر احتمالات تقاضا در تناسب حذف شده باشد. برای این منظور از ۳۰ جواب یکسان استفاده کردیم. از آنجا که جواب‌های اولیه‌ی یکسان‌اند، باید زمان اجرای برنامه در حدی تعیین شود که جواب‌های نهایی هزینه، اختلاف کمی داشته باشند.

بدین‌منظور هر کروموزوم ۳۰ بار مدل شده و آزمون یکسانی میانگین‌ها برای تناسب‌های به‌دست آمده محاسبه می‌شود. میانگین و انحراف معیار تناسب‌ها برای زمان‌های اجرای متفاوت محاسبه شده و براساس آن، آزمون t برای خطای کم‌تر از ۹۰٪ در یکسانی تناسب‌ها محاسبه می‌شود. طبق جدول ۲، زمان اجرا برای کروموزوم‌های هر نسل ۳۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود.

۳.۴. زمان آماده‌سازی مدل[13] (Tw)

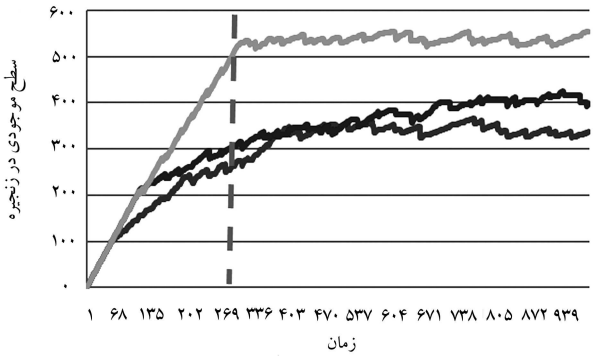
زمان آماده‌سازی سیستم، زمانی است که سیستم شبیه‌سازی به حالت تعادل می‌رسد. سیستم تولید انبوه یک سیستم پیوسته است. در ابتدای شبیه‌سازی، هیچ محصولی در سیستم وجود نداشته و به‌تدریج با آغاز شبیه‌سازی، کانبان‌های خالی سفارش و تولید، شروع به انباشتن سیستم از طریق تولید محصولات در حین ساخت می‌کنند. البته مقدار محصولات نیمه‌ساخته‌ی بین کارخانه‌یی را که در انبارهای قبل و بعد از کارخانه‌ها موجودند، تعداد کانبان‌ها تعیین می‌کنند. اگر در ابتدای زمان شبیه‌سازی، سفارشی درخواست شود، سفارش مذکور تا پرشدن زنجیره‌ی تأمین از محصولات، تأخیر خورده و نتایج برخلاف واقعیت به دست می‌آیند. زمان آماده‌سازی سیستم هنگامی رخ می‌دهد که مقادیر موجودی در زنجیره‌ی تأمین یکنواخت شوند.[21]

در زمان آماده‌سازی، داده‌های کوچک‌ترین فاصله‌ی زمانی شبیه‌سازی را ($[0, t_{min}^{sim}[$) در نظر نمی‌گیریم.[22] برای به‌دست آوردن زمان آماده‌سازی، مدل‌ها را آنقدر اجرا می‌کنیم تا موجودی در زنجیره‌ی تأمین یکنواخت شود. در ادامه به چند نمونه از اجرای شبیه‌سازی و ایجاد روند یکنواخت‌سازی موجودی در زنجیره‌ی تأمین در زمان آماده‌سازی، اشاره شده است (شکل ۴).

بدین‌منظور، زمان هموار شدن موجودی در زنجیره‌ی تأمین را مانیتور می‌کنیم و زمان آماده‌سازی را محاسبه می‌کنیم. زمان آماده‌سازی را چنان در نظر می‌گیریم

جدول ۲. حداکثر زمان لازم برای شبیه‌سازی هر کروموزوم.

زمان اجرا	میانگین زمانی تولید محصول	انحراف معیار مقادیر تولید	آزمون t برای یکسانی جواب‌های هر نسل
۲۰۰	۰٫۵۱	۰٫۲۵۲	−۳٫۷۸
۱۰۰۰	۰٫۶۶۵	۰٫۰۸۳۳	−۱٫۶۵
۲۰۰۰	۰٫۶۶۸	۰٫۰۸۳	−۱٫۴۴
۳۰۰۰	۰٫۶۹۶	۰٫۰۵۷۱	۰٫۷۸
$t_{\infty(\%90)} = 1{,}3$			



شکل ۴. روند به دست آوردن زمان آماده‌سازی.

که موجودی سیستم، در ۹۵ درصد از جواب‌ها، در این زمان ثبات پیدا کند. ۲۷۱ دوره‌ی زمانی، k، یعنی کم‌تر از ۱۰ درصد ازکل زمان شبیه‌سازی، برای آماده‌سازی برای شبیه‌سازی هر کروموزوم کافی است.

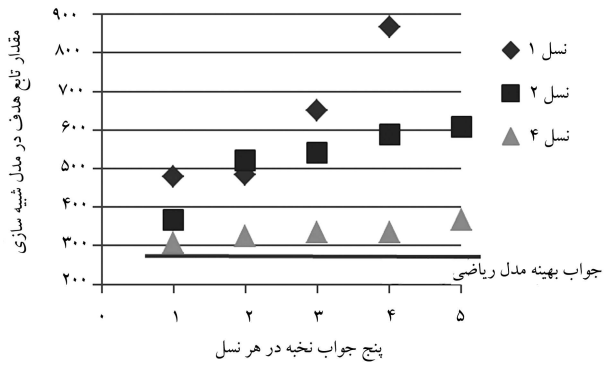
۴.۴. اعتبارسنجی مدل

در فاز اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی، با ساده‌سازی مدل به حالت زنجیره‌ی تأمین بدون در نظرگرفتن سایز دسته‌ی انتقالی بین کارخانه‌ها، نتایج مدل شبیه‌سازی را با مدل ریاضی به دست آمده در مطالعات پیشین.[۱۵] مقایسه می‌کنیم.

در مدل زنجیره‌ی تأمین مذکور ــ که زنجیره‌ی تأمینی سه‌سطحی سریالی است ــ زمان انتقال محصولات بین سه کارخانه را ۱، و ظرفیت تولید آن‌ها را ۴ فرض کرده‌ایم. تابع توزیع تقاضا در این مدل، تابع گسسته‌ی باینومیال با میانگین ۲ فرض شده و تقاضای عقب افتاده بیش از ۱۰ در نظرگرفته نمی‌شود.

هزینه‌ی نگه‌داری موجودی درکارخانه‌ها به‌ترتیب برای سه کارخانه، ۱، ۳ و ۵ در نظرگرفته شده و هزینه‌ی دیرکرد محصول در انتهای زنجیره، معادل ۱۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود. همچنین مجموع هزینه‌های سفارش و کشش محصول از کارخانه‌ی قبل به‌ترتیب ۱، ۲، ۳ و باقی هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین ــ مانند هزینه‌های مربوط به کانبان‌ها ــ صفر در نظرگرفته شده است. اگر تولید در هر زمان به ۴ محصول در واحد زمان برسد، هزینه‌یی معادل ۵۰ بر سیستم تحمیل می‌شود؛ در غیر این صورت این هزینه صفر در نظرگرفته می‌شود.

با ساده شدن مدل، جواب بهینه‌ی مدل تنها پس از طی ۴ نسل در مدل شبیه‌سازی، به ۹۵ درصد جواب بهینه در مدل ارائه شده توسط کوجیما و همکاران رسید. سایر جواب‌ها و توابع هزینه‌یی آن‌ها را می‌توان در شکل ۵ مشاهده کرد.



شکل ۵. مقایسه‌ی جواب مدل ریاضی و مدل شبیه‌سازی.

۵. بهینه‌یابی

پس از هر بار شروع مجدد سیستم، الگوریتم بهینه‌سازی، مقادیر کانبان کششی و تولیدی، و نیز مقدار سایز دسته‌ی هر واحد تولیدی را در شبیه‌سازی اعمال می‌کند. پس از اتمام شبیه‌سازی، برازندگی‌های هر جواب ثبت می‌شود و با شروع مجدد سیستم، جواب بعدی در مدل وارد خواهد شد. این فرایند تا پایان تخصیص تمامی برازندگی‌های جواب‌های یک نسل ادامه می‌یابد. جواب‌ها شامل سه نوع از متغیرها هستند:

- کانبان‌های تولیدی برای هر کارخانه؛
- کانبان‌های کششی بین هر دو کارخانه؛
- سایز دسته‌ی محصولات انتقالی بین هر دو کارخانه.

سپس، فرایند انتخاب و الگوریتم ژنتیک روی نسل اجرا شده و نسل بعدی ایجاد می‌شود.

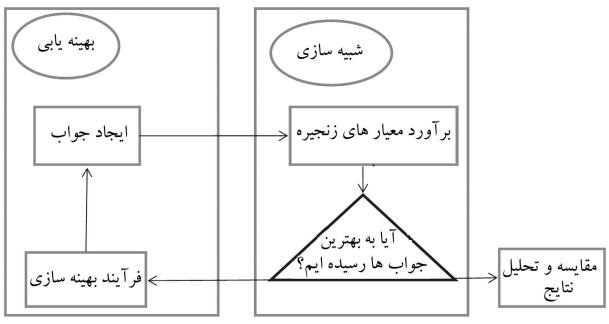
در این مدل برای بهینه‌یابی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. الگوریتم‌های ژنتیک گروهی از الگوریتم‌های تصادفی‌اند که از تکامل طبیعی در سیستم‌های زیست‌شناختی الهام گرفته‌اند. این الگوریتم‌ها را می‌توان با توجه به پارامترهای احتمالی و غیر قابل پیش‌بینی مدل‌های بهینه‌سازی، مورد استفاده قرار داد.[۶]

فرایند بهینه‌یابی در الگوریتم ژنتیک مبتنی بر روندی تصادفی و در عین حال هدایت شده است. در این روش، ابتدا متغیرهای تصمیم‌گیری برای جواب‌های اولیه به‌صورت اتفاقی ایجاد می‌شوند. پس از اجرای برنامه‌ی شبیه‌سازی، اعضای جامعه، با هدف رسیدن به عضوی مطلوب تکامل می‌یابند. ارتباط بین مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در شکل ۶ قابل مشاهده است.

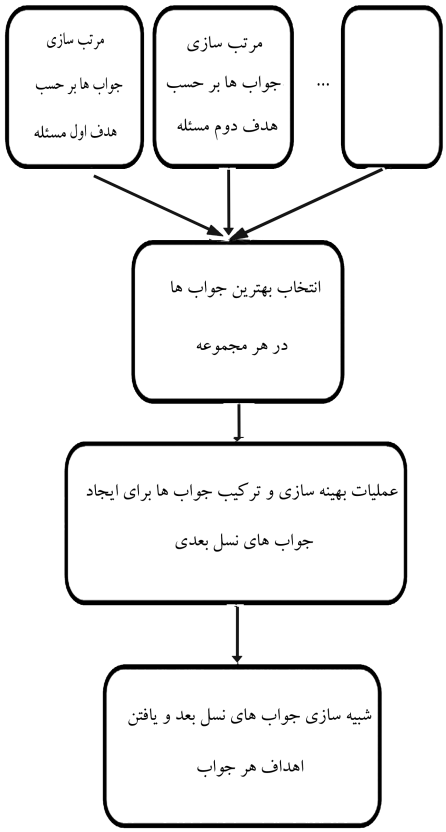
کروموزوم‌های هر نسل، شامل سه نوع از متغیرهای زنجیره‌ی تأمین، (کانبان‌های کششی، کانبان‌های تولیدی و مقادیر سایز دسته برای هر کارخانه) است. بنابراین مجموعاً ۱۲ متغیر برای ۴ سطح از زنجیره‌ی تأمین، در نظرگرفته می‌شود. هر جواب در یک سطر از جدول جواب‌ها در بهینه‌سازی ذخیره شده و ستون‌های جدول، مقدار متغیرهای هر جواب را در خود جای داده‌اند.

در این تحقیق، الگوریتم بهینه‌سازی و مدل شبیه‌سازی زنجیره‌ی تأمین به‌صورت یکپارچه طراحی شده‌اند؛ بدین‌ترتیب که مدل بهینه‌سازی تناسب جواب‌ها را برحسب اهداف مختلف سنجیده، و برای ایجاد نسل‌های بعدی از ترکیبی ازکلیه‌ی جواب‌های مناسب استفاده می‌کند.

جواب‌های ایجادشده در نسل‌های بعد، ممکن است ترکیبی از جواب‌های مناسب با معیارهای مختلف بهینه‌گی و یا ترکیبی از بهترین جواب‌های یک معیار باشند. در بسیاری از نتایج به دست آمده، جواب‌هایی یافت می‌شوند که براساس تمامی



شکل ۶. ارتباط بین مدل‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی.



شکل ۷. الگوی بهینه‌سازی ابتکاری برای چند هدف.

اهداف، بهینه بوده و بر همه‌ی جواب‌های به‌دست آمده چیرگی دارند. در شکل ۷، الگوی ایجاد شده برای بهینه‌یابی براساس چند هدف، که در این تحقیق ابداع و اجرا شده است، مشاهده می‌شود.

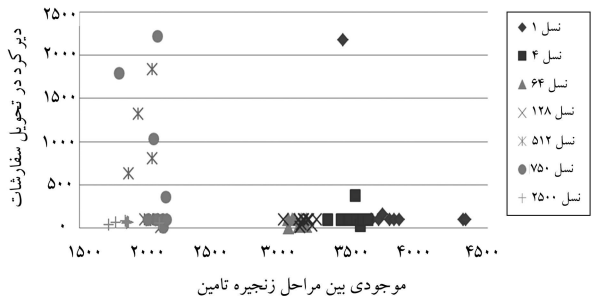
۶. نتایج

در شکل ۸ روند بهبود جواب‌ها برای دو هدف متفاوت زنجیره‌ی تأمین، با استفاده از الگوریتم ژنتیک تغییر یافته در این نوشتار، نشان داده شده است. در زنجیره‌ی تأمین فرضی چهار سطحی، تناسب به دست آمده از هر جواب، (تأخیر در تحویل سفارشات و سطح موجودی در زنجیره‌ی تأمین) برای ده جواب بهتر در نسل‌های مختلف، در شکل ۸ نمایش داده شده است. پس از طی ۲۵۰۰ نسل، اثری از بهبود در جواب‌ها دیده نمی‌شود.

چنان که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد نسل‌ها میانگین سایز دسته، یا مجموع کانبان‌های تولیدی و کششی تغییر چندانی نمی‌کند و تنها نحوه‌ی تخصیص کانبان‌ها و سایز دسته‌ها بین مراحل زنجیره‌ی تأمین تغییر می‌کند.

با توجه به داشتن دو تابع هدف در این نوشتار، جواب‌های بهینه در نمودار دوبعدی نمایش داده می‌شوند. سه لایه‌ی بهتر از مجموع جواب‌های یافت شده، پس از طی ۲۵۰۰ نسل از بهینه‌سازی، در شکل ۹ نشان داده شده است.

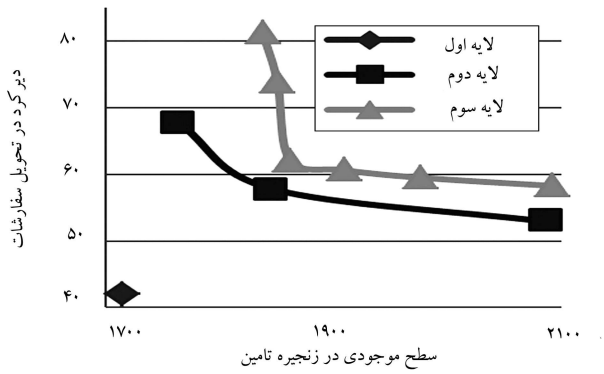
چنان که مشاهده می‌شود، مدل به جوابی منتهی شده که در هر دو معیار بهینه‌سازی بر سایر جواب‌ها چیره است. در بهترین لایه‌ی جواب‌ها فقط یک جواب به چشم می‌خورد، این در حالی است که لایه‌ی دوم جواب‌ها دارای ۳ جواب و لایه‌ی



شکل ۸. روند برازندگی برای ده نخبه نسل‌های مختلف.

جدول ۳. میانگین مقادیر به دست آمده برای متغیرهای تصمیم برای ۱۰ عضو نخبه در نسل‌های ۵۱۲ و ۲۵۰۰.

میانگین نسل ۲۵۰۰		
تعداد کانبان‌های تولیدی	تعداد کانبان‌های کششی	مجموع سایز دسته
۴۰	۶۲	۸
میانگین نسل ۵۱۲		
تعداد کانبان‌های تولیدی	تعداد کانبان‌های کششی	مجموع سایز دسته
۶۰	۴۷	۵

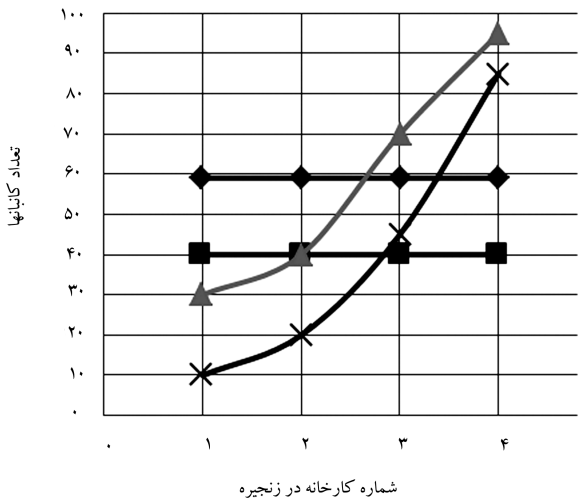


شکل ۹. مقایسه لایه‌های مختلف جواب در حالت بهینه.

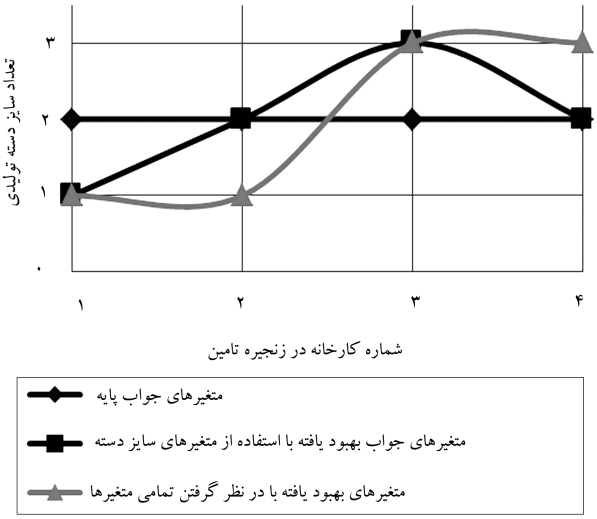
سوم شامل ۶ جوابی است که بر یکدیگر چیرگی ندارند. برای درک تأثیر متغیرهای جواب‌های بهینه بر اهداف زنجیره، مقدار مجموع متغیرهای بهینه‌ی به دست آمده توسط الگوریتم را به‌طور مساوی بین کارخانه‌ها پخش می‌کنیم. (به‌طور مثال از ۱۶۰ کانبان تولیدی به‌دست آمده در جواب بهینه، ۴۰ کانبان به هر کارخانه اختصاص داده می‌شود).

نحوه‌ی پراکندگی کانبان‌ها در سطوح کارخانه، در جواب بهینه و جواب پایه، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. چنان که مشاهده می‌شود، با افزایش سطح زنجیره، بر تعداد کانبان‌های کششی و تولیدی در سطوح زنجیره افزوده می‌شود. این امر، برای پوشش تقاضای احتمالی در انتهای زنجیره و کاهش دیرکرد در تحویل سفارشات ایجاد می‌شود. به این ترتیب، میزان موجودی در سطوح انتهایی زنجیره، از سطوح ابتدایی آن بالاتر خواهد بود. در ادامه، درمورد تأثیر یکنواخت شدن کانبان‌ها در همه‌ی سطوح زنجیره، توضیح داده شده است.

بدین‌منظور، جواب پایه یا اولیه را در مدل شبیه‌سازی وارد کرده و تناسب این جواب را به‌دست می‌آوریم. همچنین جواب پایه‌یی را تشکیل می‌دهیم که متغیرهای کانبان در این جواب، مانند جواب پایه به‌طور مساوی بین کارخانه‌ها پخش می‌شوند



شکل ۱۰. پراکندگی کانبان‌ها در سطوح کارخانه.



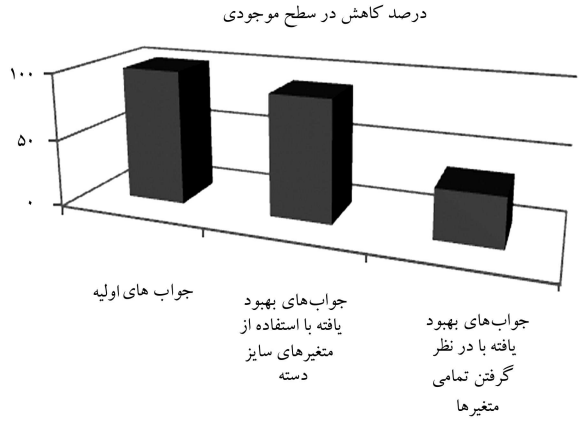
شکل ۱۱. پراکندگی سایز دسته‌های تولیدی در سطوح کارخانه.

اما متغیرهای سایز دسته می‌توانند با جواب پایه متفاوت باشند. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی، تنها با تغییر در متغیرهای سایز دسته، بهترین جواب را می‌یابیم.

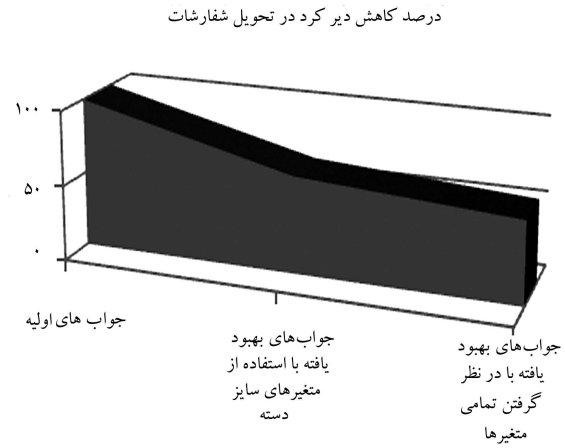
چنان که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نحوه‌ی پراکندگی سایز دسته‌ی تولیدی در سطح زنجیره، در جوابی که متغیرهای سایز دسته درآن بهبود یافته‌اند، با جوابی که تمام متغیرهای آن بهبود یافته‌اند، (جواب بهینه) متفاوت است.

برای مقایسه‌ی بهترین جواب با جواب‌های پایه، ابتدا کاهش سطح موجودی را به‌عنوان هدف زنجیره‌ی تأمین بررسی می‌کنیم. نخست تأثیر متغیر سایز دسته‌ها و سپس تأثیر تمامی متغیرها از جمله سایز دسته‌ها وکانبان‌ها سنجیده می‌شود. در شکل ۱۲ درصد کاهش در سطح موجودی با توجه به متغیرهای فوق، نشان داده شده است.

چنان که مشاهده می‌شود تنها با متغیر قرار دادن سایز دسته‌های بین دو کارخانه،



شکل ۱۲. درصد کاهش سطح موجودی در حالت‌های مختلف بهینه‌سازی.



شکل ۱۳. درصد کاهش تأخیر در تحویل سفارشات در حالت‌های مختلف بهینه‌سازی.

سطح موجودی در بهترین جواب یافت شده به ۸۹ درصد جواب اولیه و با متغیر قرار دادن کانبان‌های کششی و تولیدی، بهترین جواب یافت شده به ۳۶ درصد جواب اولیه رسید. در هدف کاهش تأخیر در تحویل سفارشات، برای مقایسه‌ی بهترین جواب نیز داریم (شکل ۱۳).

چنان که مشاهده می‌شود، تنها با اضافه کردن متغیرهای سایز دسته‌ی محصولات بین کارخانه‌ها، بهبود تابع هدف دوم تا ۶۵ درصد و با اضافه کردن متغیرهای کانبان، این میزان به ۵۵ درصد جواب اولیه رسید. با توجه به نمودارهای فوق، استفاده از سایز دسته‌های تولیدی بین کارخانه‌ها نسبت به مقدار موجودی بین زنجیره، تأثیر بیشتری بر روی تحویل سفارشات خواهد داشت و میزان موجودی، بیشتر به اندازه‌ی کانبان‌های تولیدی و کششی مربوط است.

۷. نتیجه‌گیری

در دنیای تجاری امروزی، عدم دیرکرد در پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان و حفظ هزینه‌های تولید در پایین‌ترین سطح ممکن، از مسائل حیاتی در بقای شرکت‌ها و حضور در میدان رقابت است. از سال ۲۰۰۰ تا کنون، با افزایش نیاز صنایع تولیدی به جایگزینی مدل‌سازی زنجیره‌ی تأمین با مدل‌سازی جداگانه برای هر عضو از زنجیره‌ی تأمین، تحقیقات به سمت مدل‌سازی زنجیره‌ی تأمین سوق پیدا کرده‌اند. مدل زنجیره‌ی تأمین نیز مانند بسیاری از زمینه‌های مورد مطالعه در مهندسی صنایع،

با چالش‌های زیادی مواجه بوده است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها که مدل‌های نظری را به مدل‌های حقیقی نزدیک‌تر می‌کند، متغیر بودن تعداد تقاضاها در انتهای زنجیره است.

در بسیاری از تحقیقات، از میانگین توابع احتمالی داده‌های گذشته، به‌عنوان پارامتر ورودی مدل استفاده شده است. اتفاقی بودن تقاضا ممکن است از یک سو منجر به بالا رفتن سطح موجودی در زنجیره‌ی تأمین و ایجاد محصولات بدون مشتری در انتهای زنجیره، و از سوی دیگر منجر به انباشته شدن تقاضاها و عدم توانایی زنجیره در پاسخ‌گویی مناسب می‌شود. هر دو حالت فوق، هزینه‌های زیادی را به همه‌ی اعضای زنجیره‌ی تأمین تحمیل می‌کنند.

مدل‌سازی زنجیره‌ی تأمین با الگوی تولید ناب، می‌تواند پاسخ‌گوی بسیاری از این مشکلات باشد. بر این اساس، در این نوشتار از دو نوع کانبان تولیدی و کششی استفاده شده است. کانبان‌های تولیدی، برای تولید سفارشات یک کارخانه و کانبان‌های کششی برای سفارش محصولات از یک کارخانه به کارخانه‌های مجاور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شبیه‌سازی ابزاری است که می‌توان در حل مسائل شبیه به واقعیت از آن کمک گرفت. بسیاری از این مسائل به‌علت پیچیدگی، توسط مدل‌های ریاضی و یا تحقیق در عملیات، قابل حل نیستند. برخلاف سایر مدل‌سازی‌هایی که تاکنون انجام شده‌اند، در مدل‌سازی زنجیره‌ی تأمین به‌هنگام در این نوشتار، با استفاده از ابزار شبیه‌سازی، پارامترهای احتمالی تقاضا و سایز دسته‌ی محصولات، به‌طور همزمان درنظر گرفته شده‌اند. با ترکیب شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، اهداف زنجیره‌ی تأمین (کاهش دیرکرد در تحویل سفارشات و کاهش سطح موجودی) بهینه می‌شوند. در پایان با بررسی زنجیره‌ی تأمین چهار سطحی، الگوریتم بهینه‌سازی برمبنای شبیه‌سازی طراحی شده، و نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرند. از جنبه‌های نوآوری این نوشتار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- توسعه‌ی مدل زنجیره‌ی تأمین به‌هنگام، در جهت تطابق بیشتر با واقعیت (با در نظرگرفتن سایز دسته‌های تولیدی به‌عنوان متغیر تصمیم در مدل).
- ترکیب شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در یک مدل یکپارچه، برای مدل‌سازی زنجیره‌ی تأمین چندسطحی.
- طراحی الگویی برای بهینه‌یابی مدل‌هایی با هدف‌های چندگانه.

از نتایج طراحی الگوی مدل زنجیره‌ی تأمین به‌هنگام، می‌توان به بهبود بیش از ۵۰ درصد در هر تابع هدف، نسبت به مدل‌های پایه، اشاره کرد. براساس نتایج به دست آمده، متغیرهای سایز دسته‌های تولیدی در زنجیره‌ی تأمین، بیشتر بر هدف کاهش دیرکرد در تحویل سفارشات تأثیر می‌گذارند، در حالی که کانبان‌های تولیدی و کششی، به‌طور مستقیم، بر سطح موجودی زنجیره‌ی تأمین، تأثیر می‌گذارند. برای کاهش در تأخیر سفارشات، متغیرهای کانبان در زنجیره، در حالت بهینه، با افزایش سطح در زنجیره، روندی صعودی پیدا می‌کنند. بنابراین، در حالت بهینه، موجودی بیشتری در سطوح پایانی زنجیره، وجود خواهد داشت.

پانوشت‌ها

1. responsiveness
2. effectiveness
3. just in time (JIT)
4. batch size
5. supply chain management (SCM)
6. game theory
7. hybrid ahgorithm
8. production kanban
9. withdrawal kanban
10. lead time
11. work in process (WIP)
12. run time
13. Warm Up

منابع (References)

1. Moron, D.K. and Haan, J. "Improving supply chain performance to satisfy final customers: "Leagile" experiences of a polish distributor", *International Journal of Production Economics*, **133**, pp. 127-134 (2011).
2. Ketikidis, P.H., Koh, S.C.L., Dimitriadis, N., Gunasekaran, A. and Kehajova, M. "The use of information systems for logistics and supply chain management in South East Europe: Current status and future direction", *Omega*, **36**(4), pp. 592-599 (2008).
3. Simchi-Levi, D., Kaminsky, P. and Simchi-Levi, E., *Designing and Managing the Supply Chain*, McGraw-Hill Irwin, New York, NY (2003).
4. Gnoni, M.G., Iavagnilio, R., Mossa, G., Mummolo, G. and Dileva, A. "Production planning of a multi-site manufacturing system by hybrid modeling: A case study from the automotive industry", *International Journal of Production Economics*, **85**(2), pp. 251-262 (2003).
5. Shanthikumar, J.G. and Sargent, R.G. "A unifying view of simulation/analytic models and modeling", *Operations Research*, **31**(6), pp. 1030-1052 (1983).
6. Paul, R.J. and Chanev, T.S. "Simulation optimization using a genetic algorithm", *Simulation Practice and Theory*, **6**, pp. 601-611 (1998).
7. Wan, X., Orun, S., Pekny, J.F. and Reklaitis, G.V. "A simulation based optimization framework to analyze and investigate complex supply chains", *Computer Aided Chemical Engineering*, **15**, pp. 630-635 (2003).
8. Jung, J.Y., Blau, G., Pekny, J.F., Reklaitis, G.V. and Eversdyk, D. "A simulation based optimization approach to supply chain management under demand uncertainty", *Computers and Chemical Engineering*, **28**(10), pp. 2087-2106 (2004).
9. Fernando, D.M., Espufia, A. and Puigjaner, L. "Supply chain management through a combined simulation-optimization approach", *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, **20**, pp. 1405-1410 (2005).

10. Abdelaziz, F.B. "Solution approaches for the multi-objective stochastic programming", *European Journal of Operational Research,* **216**, pp. 1-16 (2012).

11. Mansouri, A.S., Gallear, D. and Askariazad, M.H. "Decision support for build-to-order supply chain management through multiobjective optimization", *International Journal of Production Economics*, **135**, pp. 24-36 (2012).

12. Bachelet, B. and Yon, L. "Model enhancement: Improving theoretical optimization with simulation", *Simulation Modeling Practice and Theory*, **15**(6), pp. 703-715 (2007).

13. Bonfill, A., Espu, A. and Puigjaner, L. "Decision support framework for coordinated production and transport scheduling in SCM", *Computers and Chemical Engineering*, **32**(6), pp.1206-1224 (2008).

14. Yoo, T., Cho, H. and Yücesan, E. "Hybrid algorithm for discrete event simulation based supply chain optimization", *Expert Systems with Applications*, **37**, pp. 2354-2361 (2010).

15. Sana, S.S. "A production-inventory model of imperfect quality products in a three-layer supply chain", *Decision Support Systems,* **50**, pp. 539-547 (2011).

16. Schonberger, R.J. "Japanese production management: An evolution - With mixed success", *Journal of Operations Management,* **25**, pp. 403-419 (2007).

17. Kaneko, J. and Nojiri W. "The logistics of just-in-time between parts suppliers and car assemblers in Japan", *Journal of Transport Geography*, **16**(3), pp. 155-173 (2008).

18. Hao, Q. and Shen, W. "Implementing a hybrid simulation model for a Kanban-based material handling system", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, **24**(5), pp. 635-646 (2008).

19. Naim, N.N. and Gosling, J. "On leanness, agility and leagile supply chains", *International Journal of Production Economics,* **131**, pp. 342-354 (2011).

20. Kojima, M., Nakashima, K. and Ohno, K. "Performance evaluation of SCM in JIT environment", *International Journal of Production Economics,* **115**(2), pp. 439-443 (2008).

21. Matsui, Y. "An empirical analysis of just-in-time production in Japanese manufacturing companies", *International Journal of Production Economics,* **108**, pp. 153-164 (2007).

22. Skelton, W.D., Sadowski, R.P. and Sadowski, D.A., *Simulation with Arena*, Second Edition, Mc Graw Hill publication (2002).

23. Ewald, R. and Uhrmacher, A.M. "Automating the runtime performance evaluation of simulation algurithms", *Winter Simulation Conference* (2009).

SIMULATION OF JIT MULTISTAGE SUPPLY CHAIN AND OPTIMIZATION OF OBJECTIVES

S.K. Chaharsooghi(corresponding author)
skch@modares.ac.ir
A. Sajedinejad
sajedinejad@modares.ac.ir
Dept. of Industrial Engineering
Tarbiat Modares University

Sharif Industrial Engineering and Management Journal
Volume 29, Issue 2, Page 73-81, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 11 April 2011; received in revised form 25 December 2011; accepted 12 February 2012.

Abstract

It is difficult to determine an inventory level all through a supply chain (SC), in such a way that the desired objectives, such as effectiveness and responsiveness, can be obtained. Simulation is a means of solving problems which cannot be solved by mathematical models, due to the complexity of the problems.

Managers are, on the one hand, engaged in the strategic decision making of the chain, as well as various kinds of cooperation among members, and, on the other hand, with the quantities of inventory all through the chain. Strategies of each member of the supply chain and/or the whole supply chain can be based on meeting the needs (such as short-time delivery, producing new products, high level of availability of products, and so on) or effectiveness of the SC (low price of products, decreasing costs, and effectively using capital).

Determining the level of inventory along a supply chain, in such a way that consumer satisfaction will be met to a favorable degree, taking into consideration responsiveness or effectiveness, is difficult. The present research is intended to study the inventory of a supply chain, as well as modeling the supply chain and determining multiple objectives in models for a four-stage, single-product supply chain. The use of metaheuristic techniques leads to optimization of these variables, which helps decrease delay in both product delivery and inventory levels of SC.

The present paper is aimed at JIT supply chain simulation together with optimization of the objectives of the SC. Variables of the simulation model include two types of Kanbans, namely; withdrawal and production, to determine the inventory level of SC and the batch size of delivery parts for each stage of the supply chain. Using metaheuristic techniques leads to optimization of these variables towards decreasing delay in the delivery and inventory levels of SC.

Key Words: Simulation, optimization, supply chain, just in time, Kanban.