مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۱ - ۳۰، شماره‌ی ۲، ص. ۲۷-۳۷

Original Article

مدیریت موجودی در یک سیستم زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته‌ی سه‌سطحی با بازگشتی‌ها و تقاضای همبسته

راشد صحرائیان * **(استادیار)**
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه شاهد

الهه مالکی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

شادی عقیمی‌پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

این نوشتار به بررسی مسئله‌ی مدیریت موجودی در یک زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، و نیز بسط و توسعه‌ی مدل‌های قطعی و تصادفی برای یک سیستم سه‌سطحی زنجیره‌ی تأمین با تقاضا و بازگشتی همبسته اختصاص دارد. بدین‌منظور، هزینه‌ها از دیدگاه سیستم موجودی در نظر گرفته شده، و سیستم بازنگری موجودی در هر دو صورت مرور دائم و مرور دوره‌یی تحت حالت‌های فروش از دست رفته و تخصیص مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار مطلب به حل مدل پرداخته و اثر تغییر پارامترها تجزیه و تحلیل می‌شود. حل مثال‌های عددی نشان می‌دهد که همیشه نرخ بالای بازگشتی منجر به کاهش هزینه‌ی سیستم نمی‌شود و کاهش یا افزایش آن بستگی به سایر پارامترها دارد. همچنین در این نوشتار هزینه‌های سیستم بازنگری موجودی مرور دوره‌یی و دائم نیز مقایسه می‌شوند. در هر حال مدیران هنگام انتخاب سیستم مدیریت موجودی خود باید به تحلیل تمامی پارامترها بپردازند.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، موجودی، محصولات بازگشتی، الگوریتم ژنتیک، همبستگی، چندسطحی.

sahraeian@shahed.ac.ir
elaheh_maleki2003@yahoo.com
sh.Aghimipoor@gmail.com

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر به‌دلیل قوانین دولتی، مسائل محیطی، مسئولیت اجتماعی و فشارهای مشتری، لجستیک معکوس و زنجیره‌ی تأمین پایه‌یی، عملیات تولید مورد توجه بسیاری از محققین قرارگرفته است.[۱-۸] مهم‌ترین و اساسی‌ترین نظریه در تمام تحقیقات انجام شده در این زمینه این است که «یک‌پارچه‌سازی و تلفیق بازیافت محصول با زنجیره‌ی تأمین پیشرو سنتی، منجر به ایجاد زنجیره‌یی جدید می‌شود که مجموعه‌یی از بازگشتی‌ها و طراحی شبکه‌ی لجستیک معکوس برای بازیافت محصول، زمان‌بندی تولید و مدیریت موجودی‌های را در بر خواهد گرفت». مدیریت بازیافتی‌های محصول درکشورهای توسعه‌یافته، از قبیل آمریکای شمالی و اروپا، اجباری شده است تا از این طریق از آلودگی‌ها و ضایعات جلوگیری به‌عمل آید. بنابراین تولیدکنندگان ملزم به تولید محصولاتی با اجزای قابل بازیافت، و در عین حال دست‌یابی به ارزش اقتصادی لازم از ناحیه‌ی بازیافتی‌های محصول خواهند بود.

عملیات بازیافت مناسب، قطعاً به کیفیت بازیافتی‌ها بستگی دارد. عملیات بازیافت محصول براساس کیفیت و میزان دمونتاژ برگشتی‌ها به پنج دسته‌ی تعمیر[۱]، نوسازی[۲]، بازسازی[۳]، جداسازی[۴] و بازیافت[۵] تقسیم شده است.[۹] در میان موارد ذکر شده، عملیات بازسازی از درجه اهمیت بالاتری برخوردار است که خصوصاً برای محصولاتی با طول عمر بالا از قبیل موتورهای اتومبیل، ابزارهای ماشین و فتوکپی‌ها مفید است. گردش مالی صنایع بازسازی کننده در آمریکا بین ۴۰ تا ۵۰ میلیارد برآورده شده است. هزینه‌ی بازسازی کلاً ۴۰ تا ۶۰ درصد هزینه‌ی تولید یک محصول جدید است. محصولات بازسازی شده به‌خوبی محصول دست اول آن فرض می‌شود و معمولاً با همان ضمانت ولی با قیمت کم‌تری فروخته می‌شود.[۹] این موضوع برای تولیدکنندگان فرصتی فراهم می‌آورد تا هم منافع و سودهایی از بازیافت به دست آورند و هم این که در پروژه‌ی زنجیره‌ی تأمین دوست‌دار محیط زیست مشارکت کنند.

مدیریت موجودی در زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته بسیار پیچیده‌تر از زنجیره‌ی تأمین سنتی است، زیرا بازگشتی‌ها به‌لحاظ مقدار، کیفیت، زمان‌بندی و هزینه‌های نگه‌داری موجودی ــ نسبت به تقاضا ــ از عدم قطعیت بیشتری برخوردارند.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۷/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۲/۴/۲۰، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۱.

افزون بر این، همبستگی بین تقاضا و بازگشتی ابعاد دیگری از پیچیدگی را به این سیستم‌ها افزوده است.[۱۰] این همبستگی ممکن است یک همبستگی کاملاً مثبت برای محصولات تغییرپذیر، یا یک همبستگی با درجه آزادی برای محصولات با سیکل کوتاه (مانند کانتینرها و دوربین‌های یک‌بار مصرف)، یا تقریبا بدون همبستگی برای محصولات با طول عمر طولانی (مانند تجهیزات الکتریکی) باشد.

سیستم‌های موجودی چندسطحی، یکی از زمینه‌های مهم و مطرح در مدل‌سازی مدیریت زنجیره‌ی تأمین در سطح عملیاتی است که تحقیقات بسیار زیادی درمورد آن در حال انجام است. در هر زنجیره‌ی تأمین سطوح موجودی با یکدیگر رابطه دارند، بنابراین مطالعه‌ی ارتباط متقابل آن‌ها حائز اهمیت است.

اخیراً یک مدل کنترل موجودی برای زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته با یک تأمین‌کننده، یک تولیدکننده، یک خرده‌فروش و یک مرکز جمع‌آوری با تقاضا و نرخ بازگشت قطعی و بدون کمبود توسعه یافته است.[۱۱] ولی در کل، تحقیقات محدودی درمورد زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته‌ی چندسطحی، که بازسازی تصادفی محصولات بازگشتی را نیز شامل شود، در دسترس است.[۱۲-۱۴]

این تحقیقات با در نظرگرفتن مفروضاتی از قبیل استقلال بین تقاضا و محصولات بازگشتی، یا در نظرگرفتن تعدادی از هزینه‌ها، مدل خود را محدود کرده‌اند. در پاره‌یی از این تحقیقات هزینه‌های یک سیستم کنترل موجودی شامل هزینه‌های آماده‌سازی، نگه‌داری و کمبود در نظر گرفته شده.[۱۵] ولی با این فرض که تقاضا و بازگشتی مستقل از یکدیگرند. در تحقیقی دیگر، یک سیستم دوسطحی با یک توزیع‌کننده و دو خرده‌فروش با سیستم کنترل موجودی مرور دائم ولی بدون بازگشتی بررسی شده است.[۱۶]

در بررسی مدیریت موجودی در یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی با تقاضا و بازگشتی وابسته،[۱۷] این مدل در دو حالت تصادفی و قطعی توسعه یافته است که در آن توزیع تقاضا و بازگشتی‌ها نرمال فرض شده و سیستم تحت سیاست مرور دوره‌یی موجودی مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه مطالعه درمورد زنجیره‌های تأمین دوسطحی حجم بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند، اما تحقیقاتی نیز درمورد زنجیره‌های تأمین سه‌سطحی انجام شده است. هدف این تحقیقات ایجاد هماهنگی در تمام سطوح زنجیره‌ی تأمین است.[۱۸-۲۲] در تحقیق حاضر، مدل توسعه‌یافته‌ی ذکر شده[۱۷] در زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی و در دو حالت مرور دوره‌یی و دائم موجودی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در ادامه و در بخش دوم مدل پیشنهادی توصیف می‌شود؛ در این بخش سیستم موجودی و مفروضات مدل شرح داده می‌شوند. در بخش سوم، مدل‌سازی سیستم موجودی ارائه می‌شود؛ در این بخش ابتدا مدل قطعی و سپس مدل تصادفی معرفی می‌شود. مدل تصادفی در هر دو حالت مرور پیوسته و مرور دوره‌یی موجودی مورد بحث قرار می‌گیرد. کمبود نیز به دو صورت فروش از دست رفته و تقاضای عقب‌افتاده در نظر گرفته می‌شود. در بخش چهارم با ارائه‌ی مثال‌های عددی، مدل معرفی‌شده تحلیل می‌شود. حل مدل در این بخش با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. در نهایت، بخش پنجم، به نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی اختصاص یافته است.

۲. توصیف مدل

در این نوشتار یک سیستم موجودی سه‌سطحی با بازگشت بررسی می‌شود. بازگشتی‌ها از نوع بازسازی هستند که بعد از عملیات بازیافت به‌خوبی نوع جدید و دست اول هستند. نرخ بازیافت ۱۰۰٪ فرض شده و می‌توان آن را با نمونه‌های جدید ـــ که از یک تأمین‌کننده‌ی بیرونی تهیه می‌شود ـــ تعویض کرد. همچنین فرض شده است که ارزش اقلام بازسازی شده و نمونه‌های جدید یکسان است و درنتیجه، هزینه‌های نگه‌داری و موجودی یکسان دارند. از سوی دیگر، اقلام برگشتی بازسازی‌نشده کم‌ارزش‌تر از اقلام موجود در انبار خدمات فرض شده‌اند و بنابراین هزینه‌ی نگه‌داری کم‌تری دارند. زمان بازسازی یک دسته از برگشتی‌ها در مقایسه با زمان تهیه‌ی محصولات جدید از تأمین‌کننده‌ی بیرونی در یک مرحله‌ی متناظر، ناچیز فرض می‌شود. سفارش تولید مجدد در همان لحظه‌ی پرسازی مجدد (از طریق تأمین‌کننده‌ی بیرونی) رخ می‌دهد. پرسازی مجدد و همزمان بازسازی‌شده‌ها و محصولات جدید، فرضی در مسئله است که منجر به طول دوره‌ی یکسان در مراحل متناظر می‌شود.

در اینجا هزینه‌ی آماده‌سازی و نگه‌داری موجودی در تمامی مراحل و هزینه‌های کمبود در مراحلی که شامل انبار خدمات‌رسانی هستند در نظر گرفته می‌شود و هر دو نوع مدل تصادفی و قطعی برای سیستم توسعه داده می‌شود. لازم به ذکر است که در زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، انواع دیگری از هزینه‌ها (مانند دسته‌بندی، حمل و نقل، بازرسی، بازیافت) وجود دارد ولی در اینجا ساختار هزینه از دیدگاه مدیریت موجودی تجزیه و تحلیل می‌شود و محدود به هزینه‌های کمبود، نگه‌داری موجودی و آماده‌سازی است. هدف این است که مقادیر متغیرهای سیاست موجودی (مقادیر سفارش در مدل قطعی، سطح سفارش مجدد و دوره‌ی مرور موجودی در مدل سفارش تصادفی) به‌گونه‌یی تعیین شود که در تمام مراحل، هزینه‌های کل مورد انتظار سیستم کمینه شود.

در مدل تصادفی فرض می‌شود که تقاضا و بازگشتی‌ها دارای توزیع نرمال، و در دوره‌های متفاوت مستقل از هم، ولی در یک دوره همبسته‌اند. تقاضا در این‌جا به دو صورت اتفاق می‌افتد: تقاضای محصولات جدید و تقاضای ناشی از محصولات بازگشتی. به تقاضاهای ناشی از محصولات بازگشتی، در همان دوره پاسخ داده نمی‌شود بلکه به‌صورت تقاضای عقب‌افتاده و در دوره‌ی بعدی، زمانی که بازگشتی‌ها بازسازی شدند، تأمین می‌شود. اما به تقاضای جدید در همان دوره پاسخ‌دهی می‌شود و چنانچه موجودی وجود نداشته باشد در دوره‌ی بعدی به‌محض پرسازی مجدد انبار، تأمین می‌شوند. توضیحات بیشتر درمورد مدل در بخش بعدی (مدل‌سازی) ارائه شده است.

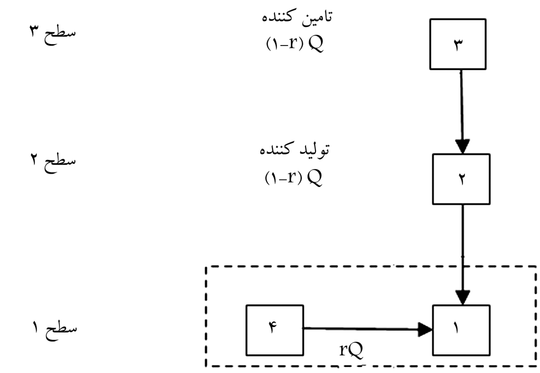
۳. مدل‌سازی

در این بخش، ابتدا یک مدل تحلیلی برای یک سیستم موجودی سه‌سطحی قطعی که شامل ۴ مرحله است، ارائه می‌شود. مراحل ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب متعلق به سطوح ۱، ۲ و ۳ هستند، و موجودی انبار خدمت‌رسانی محصولات جدید را در بر می‌گیرند. مرحله‌ی ۴ در سطح ۱ است که بازگشتی‌ها در آن بازسازی می‌شوند. ابتدا کل هزینه‌ی سیستم (TC) محاسبه می‌شود.

در ادامه، سیستم موجودی سه‌سطحی با تقاضا و بازگشتی‌های تصادفی بررسی می‌شود. در این مدل‌سازی هم سیاست مرور دائم و هم سیاست مرور دوره‌یی موجودی مطالعه می‌شود. تقاضا و بازگشتی‌ها توزیع نرمال دارند. دو موقعیت نیز در هر مدل بررسی می‌شود: حالتی که کمبود در سطح بالاتر به‌صورت فروش از دست رفته است، یا به سطح پایین‌تر تخصیص می‌یابد.

۱.۳. مدل قطعی

با استفاده از این مدل نرخ‌های تقاضا و بازگشتی یکنواخت در طول زمان، ایستا و



شکل ۱. سیستم موجودی سه‌سطحی.

قطعی بررسی می‌شود. از آنجا که نرخ‌های تقاضا و برگشتی ایستا و یکنواخت‌اند، مدل‌های موجودی با متوسط هزینه و افق زمانی نامحدود توسعه داده می‌شود. در این مقاله هزینه‌های نگه‌داری براساس سطوح متوسط زمانی موجودی ارزیابی، و کمبود در مدل تصادفی سیستم بررسی می‌شود. نتایج مدل قطعی برای مدل‌های تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

A_i: هزینه‌ی آماده‌سازی در مرحله‌ی iام ($i = 1, 2, 3, 4$)؛

h_i: هزینه‌ی نگه‌داری موجودی هر واحد در هر دوره در مرحله‌ی iام؛

μ: تقاضا در هر دوره؛

r: ضریبی از تقاضای برگشتی در هر دوره؛

Q: مقدار سفارش/اندازه دسته؛

T: طول سیکل؛

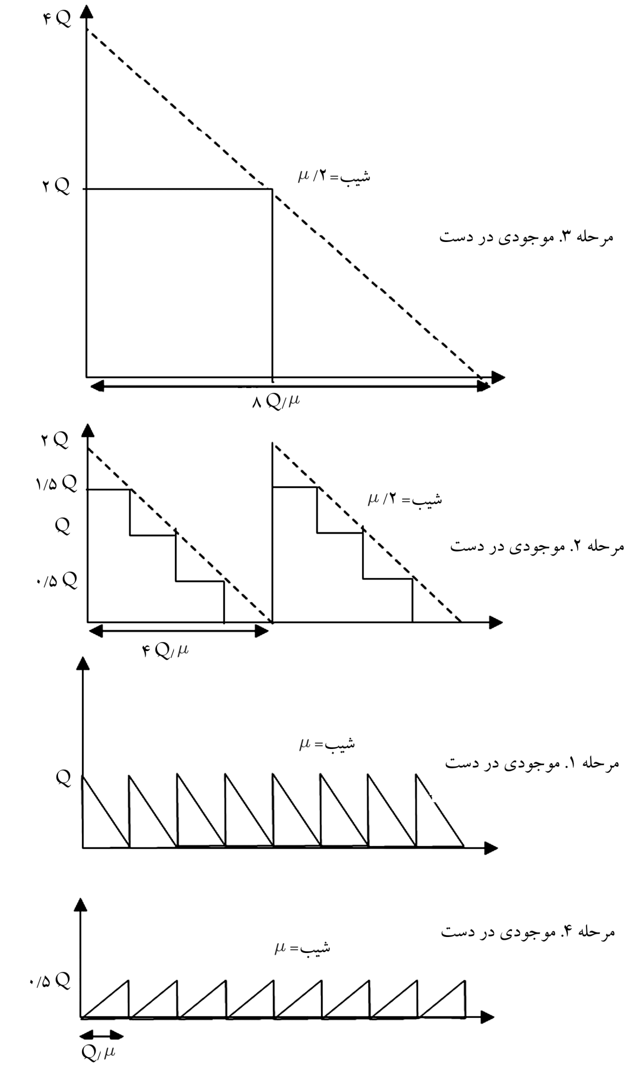
m, n: ضریب عدد صحیح.

سیستم شامل چهار مرحله است: در مرحله‌ی اول با تقاضای مشتری مواجه می‌شود؛ در مرحله‌ی دوم در سطح دوم محصول توسط کارخانه تولید می‌شود؛ در مرحله‌ی سوم مواد اولیه‌ی مورد نیاز کارخانه تأمین می‌شود. در مرحله‌ی چهارم که متعلق به سطح اول است و انبار خدمت‌رسانی را در مرحله‌ی ۱ تکمیل می‌کند، بازگشتی‌ها بازسازی می‌شوند. این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است.

چنان که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، اگر مقدار سفارش در مرحله‌ی ۱ را برابر Q فرض کنیم، طول سیکل در این مرحله Q/μ خواهد بود. مقدار بازسازی شده در مرحله‌ی ۴ در سیکل Q/μ برابر rQ است. بنابراین میزان سفارش در مراحل ۲ و ۳ برابر $(1-r)Q$ است. میزان سفارش در مرحله‌ی دوم برابر $n(1-r)Q$ است که در آن n یک ضریب عدد صحیح است. همچنین میزان سفارش در مرحله‌ی سوم نیز برابر $mn(1-r)Q$ است که در آن نیز m یک ضریب عدد صحیح در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نمودار موجودی را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که مراحل ۱ و ۴ سیکل یکسانی دارند، زیرا در بخش ۲ فرض شد که پرسازی مجدد محصولات جدید از مرحله‌ی ۲ و محصولات بازسازی‌شده مرحله‌ی ۴ در مرحله‌ی ۱ به‌طور همزمان است و در یک نقطه‌ی زمانی می‌رسند. همچنین از شکل ۲ آشکار است که تعداد آماده‌سازی‌های در مراحل ۱ الی ۴ به‌ترتیب برابر μ/Q، μ/nQ، μ/nmQ، μ/Q است. متوسط موجودی در دست در مراحل ۱ و ۴ به ترتیب $Q/2$ و $rQ/2$ است. متوسط موجودی در مرحله‌ی ۲ چنین به دست می‌آید:

$$\text{مساحت مثلث بزرگ‌تر} = \frac{1}{2}\frac{nQ^2}{\mu}n(1-r)$$

$$\text{مساحت مثلث کوچک‌تر} = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{\mu}n(1-r)$$



شکل ۲. متوسط موجودی در مراحل ۱، ۲، ۳ و ۴ ($n = 4, m = 2, r = 0/5$).

مساحت موجودی در دست: $\frac{1}{2}\frac{Q^2}{\mu}n(n-1)(1-r)$.

متوسط موجودی در دست در مرحله‌ی ۲: $\frac{1}{2}Q(n-1)(1-r)$.

به همین ترتیب متوسط موجودی در مرحله‌ی ۳ عبارت است از: $\frac{1}{2}Qn(m-1)(1-r)$.

بنابراین هزینه‌ی کل سیستم چنین به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}TC(m,n,Q) =& A_1\frac{\mu}{Q} + A_2\frac{\mu}{nQ} + A_3\frac{\mu}{nmQ} + A_4\frac{\mu}{Q}\\ &+ \frac{1}{2}Qh_1 + \frac{1}{2}Q(n-1)(1-r)h_2\\ &+ \frac{1}{2}Qn(m-1)(1-r)h_3 + \frac{1}{2}rQh_4\end{aligned}$$

با مشتق‌گیری نسبت به Q خواهیم داشت:

$$Q*(n,m) = \sqrt{\frac{2\mu(A_1 + \frac{A_2}{n} + \frac{A_3}{nm} + A_4)}{h_1 + (n-1)(1-r)h_2 + n(1-r)(m-1)h_3 + rh_4}}$$

$$T*(n,m) = \sqrt{\frac{2(A_1+\frac{A_2}{n}+\frac{A_3}{nm}+A_4)}{\mu(h_1+(n-1)(1-r)h_2+n(1-r)(m-1)h_3+rh_4)}}$$

$$Tc*(n,m) = \sqrt{\begin{array}{l}2\mu(A_1+\frac{A_2}{n}+\frac{A_3}{nm}+A_4)*\\(h_1+(n-1)(1-r)h_2+n(1-r)(m-1)h_3+rh_4)\end{array}}$$

۲.۳. مدل تصادفی

با استفاده از این مدل نرخ‌های بازگشتی و تقاضای یکنواخت، ایستا و تصادفی بررسی می‌شد. چنان که قبلاً ذکر شد، حالت‌هایی که در دو بخش فروش از دست رفته و تخصیص یافته مدل‌سازی می‌شود عبارت‌اند از:

- مدیریت موجودی در زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی با تقاضا و برگشتی دارای توزیع نرمال با سیستم مرور دوره‌یی؛
- مدیریت موجودی در زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی با تقاضا و برگشتی دارای توزیع نرمال با سیستم مرور دائم.

نمادهای مورد استفاده، علاوه بر نمادهای بخش قبلی، عبارت‌اند از:

s_i: حداکثر سطح سفارش در مرحله‌ی iام؛
k_i: فاکتور ایمنی[6] در مرحله‌ی iام؛
l_i: فاکتور زمانی تحویل در مرحله‌ی iام؛
p_i: هزینه‌ی کمبود به‌ازای هر واحد مرحله‌ی iام؛
f: تابع چگالی تقاضا؛
μ: میانگین تقاضا در هر دوره؛
σ: انحراف استاندارد تقاضا در هر دوره؛
λ: انحراف استاندارد خطای تصادفی در هر دوره؛
ϕ: PDF تابع چگالی توزیع نرمال استاندارد؛
Φ: CDF تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد؛
COV: کوواریانس؛
COR: همبستگی.

۱.۲.۳. تقاضا و بازگشتی با سیستم مرور دوره‌یی

فرض کنید که $D \sim N(\mu, \sigma^2)$ و R متغیرهایی تصادفی‌اند که تقاضا و بازگشتی را نشان می‌دهد. تقاضا و بازگشتی‌ها در دوره‌های متفاوت مستقل فرض می‌شود اگرچه به‌ازای هر دوره با رابطه‌ی $R = rD + \epsilon$ $(\varepsilon \sim N(0, \delta^2))$ همبستگی دارد. با این فرض که $COV(D, \epsilon) = 0$ داریم:

$$COR(D,R) = \frac{Cov(D,R)}{\sigma(r^2\sigma^2+\delta^2)^{1/2}} = \frac{r\sigma^2}{\sigma(r^2\sigma^2+\delta^2)^{1/2}}$$

در مراحل ۱، ۲ و ۳ سیاست مرور دوره‌یی دنبال می‌شود و تعداد n سیکل به‌ازای هر سیکل مرحله‌ی ۱ در مرحله‌ی ۲، و mn سیکل در مرحله‌ی ۳ وجود دارد. به‌عبارت دیگر، اگر مرور دوره‌یی در مرحله‌ی ۱ در هر T پریود زمانی رخ دهد، در مرحله‌ی ۲ در هر nT دوره زمانی و در مرحله‌ی ۳ در هر mnT دوره زمانی رخ خواهد داد. میزان سفارش در مرحله‌ی ۱ در واقع تقاضای مرحله‌ی ۲ است. میزان تقاضای خالص در هر تکرار در مرحله‌ی ۱، ۲ و ۳ بعد از کاستن برگشتی‌ها به‌صورت $D-R$ یا $(1-r)D-\epsilon$ نمایش داده می‌شود و درنتیجه:

$$D-R \approx N((1-r)\mu, \delta^2+\sigma^2(1-r)^2)$$

چنان که قبلاً گفته شد انبار خدمت‌رسانی، تقاضاهای ناشی از برگشتی‌ها را فوراً پاسخ نمی‌دهد بلکه به‌صورت تقاضاهای عقب‌افتاده خواهد بود. به‌عبارتی، به مشتریان معادل یک سیکل زمانی بعدی پاسخ داده خواهد شد و به آنها این نکته ذکر می‌شود که تقاضایشان بعد از این که بازگشتی‌های بازسازی شده در انبار خدمت‌رسانی مجددا پرسازی شد پاسخ داده می‌شود. اما به تقاضاهای جدید فوراً از طریق انبار خدمت‌رسانی پاسخ داده می‌شود و اگر این تقاضا در انبار موجود نباشد به‌عنوان تقاضای عقب‌افتاده خواهد بود و به محض این‌که بازپرسازی انجام گیرد پاسخ داده می‌شود. بنابراین، می‌توان برای سطح نهایی سفارش موجودی[7] چنین نوشت:

$$S_1 = (1-r)\mu(T+l_1) + k_1\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{T+l_1}$$
$$S_2 = (1-r)\mu nT + k_2\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nT}$$
$$S_3 = (1-r)\mu nmT + k_3\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nmT}$$

لازم به ذکر است از آنجا که تقاضا و بازگشتی‌ها به‌صورت یکنواخت در مرحله‌ی ۱ رخ می‌دهد، حفاظت در مقابل عدم قطعیت برای هم طول دوره و هم فاصله‌ی زمانی تحویل است. در حالی که در مراحل ۲ و ۳ سفارش‌ها در مرحله‌ی ۱ و در فواصل زمانی گسسته انجام می‌شود، و بنابراین صرفاً عبارت طول دوره در فرمول S_2 و S_3 به کار رفته است.[4]

الف) فروش از دست رفته[8]

در این مورد هیچ تقاضای عقب‌افتاده‌یی وجود ندارد و معادل فروش از دست رفته خواهد بود. برای تعیین کل هزینه‌ی مورد انتظار (ETC) در هر دوره‌ی زمانی محاسباتی انجام می‌شود که در ادامه به آنها خواهیم پرداخت.

کل هزینه‌ی آماده‌سازی در هر دوره‌ی زمانی در مراحل ۱، ۲، ۳ و ۴ برابر است با:

$$= \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{nT} + \frac{A_3}{mnT} + \frac{A_4}{T}$$

کل هزینه‌ی نگه‌داری موجودی در هر دوره‌ی زمانی در مراحل ۱، ۲، ۳ و ۴ برابر است با:

$$= \frac{1}{2}\mu Th_1 + \frac{1}{2}(n-1)(1-r)\mu Th_2 + \frac{1}{2}n(1-r)(m-1)\mu Th_3 + \frac{1}{2}\mu Th_4$$

هزینه‌ی ذخیره‌ی اطمینان مورد انتظار در هر دوره‌ی زمانی در مرحله‌ی ۱ (بدون در نظر گرفتن تقاضای منفی و کمبود) برابر است با:

$$= h_1\int_{-\infty}^{s_1}(s_1 - x_{T+l_1})f(x_{T+l_1}) \approx h_1k_1\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{T+l_1}$$

هزینه‌ی ذخیره اطمینان در مرحله‌ی ۲ (بدون در نظر گرفتن تقاضای منفی) برابر است با:

$$= h_2\int_{-\infty}^{s_2}(s_2 - x_{nT})f(x_{nT})dx_{nT} \approx h_2(k_2\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nT} + \sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nT}\{\varphi(k_2) - k_2 + k_2\phi(k_2)\})$$

هزینه‌ی ذخیره‌ی اطمینان مورد انتظار در مرحله‌ی ۳ (بدون در نظرگرفتن تقاضای منفی) برابر است با:

$$= h_3\int_{-\infty}^{s_3}(s_3 - x_{nmT})f(x_{nmT})dx_{nmT} \approx h_3(k_3\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}$$
$$\sqrt{nmT}+\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nmT}\{\varphi(k_3)-k_3+k_3\phi(k_3)\})$$

هزینه‌ی کمبود مورد انتظار در هر دوره در مرحله‌ی ۱ برابر است با:

$$= \frac{P_1}{T}\int_{S_1}^{\infty}(x_{T+l_1}-s_1)f(x_{T+l_1})dx_{T+l_1}$$
$$= \frac{P_1}{T}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{T+l_1}\{\varphi(k_1)-k_1+k_1\phi(k_1)\}$$

هزینه‌ی کمبود مورد انتظار در هر دوره در مرحله‌ی ۲ برابر است با:

$$= \frac{P_2}{nT}\int_{S_2}^{\infty}(x_{nT}-s_2)f(x_{nT})dx_{nT}$$
$$= \frac{P_2}{nT}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nT}\{\varphi(k_2)-k_2+k_2\phi(k_2)\}$$

هزینه‌ی کمبود مورد انتظار در هر دوره در مرحله‌ی ۳ برابر است با:

$$= \frac{P_3}{nmT}\int_{S_3}^{\infty}(x_{nmT}-s_3)f(x_{nmT})dx_{nmT}$$
$$= \frac{P_3}{nmT}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nmT}\{\varphi(k_3)-k_3+k_3\phi(k_3)\}$$

درنتیجه برای کل هزینه‌ی مورد انتظار (ETC) خواهیم داشت (مدل ۱):

$$\begin{aligned} ETC =& \frac{A_1}{T}+\frac{A_2}{nT}+\frac{A_3}{mnT}+\frac{A_4}{T}\\ &+\frac{1}{2}\mu Th_1+\frac{1}{2}(n-1)(1-r)\mu Th_2\\ &+\frac{1}{2}n(1-r)(m-1)\mu Th_3+\frac{1}{2}\mu Th_4\\ &+\frac{P_1}{T}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{T+l_1}\\ &\{\varphi(k_1)-k_1+k_1\phi(k_1)\}+h_1k_1\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\\ &\sqrt{T+l_1}h_2k_2\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nT}\\ &+h_3k_3\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nmT}\\ &+(h_2+\frac{P_2}{nT})\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nT}\\ &\{\varphi(k_2)-k_2+k_2\phi(k_2)\}+(h_3+\frac{P_3}{nmT})\\ &\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nmT}\{\varphi(k_3)-k_3+k_3\phi(k_3)\} \end{aligned}$$

ب) تخصیص[۹]

در این حالت اگر کمبودی در مرحله‌ی ۲ هست، به مرحله‌ی ۱ اختصاص می‌یابد و در مرحله‌ی ۳ کمبود به‌همان صورت تقاضای عقب‌افتاده خواهد بود. در چنین شرایطی هیچ هزینه‌ی کمبود جداگانه‌یی در مرحله‌ی ۲ وجود ندارد و هرگونه هزینه‌ی کمبودی در مرحله‌ی ۲، در مرحله‌ی ۱ انعکاس می‌یابد. در عبارت ETC، کل هزینه‌ی آماده‌سازی و هزینه‌ی نگه‌داری موجودی مراحل ۱ تا ۳ و هزینه‌ی ذخیره‌ی اطمینان ۲ و ۳ به همان صورت بخش قبلی باقی می‌ماند.

در مرحله‌ی ۱، n دوره به‌ازای هر دوره در مرحله‌ی ۲ وجود دارد و فرض می‌شود که $n-1$ دوره‌ی اول با هیچ کمبودی در مرحله‌ی ۲ روبه‌رو نمی‌شود و میزان کمبود در سیکل آخر مرحله‌ی ۱ اتفاق می‌افتد. بنابراین برای $n-1$ دوره‌ی اول میزان ذخیره‌ی اطمینان و کمبود به‌همان صورت بخش قبل باقی خواهد ماند. درمورد دوره‌ی پایانی بسته به این که کمبودی در مرحله‌ی ۲ وجود دارد یا خیر، دو عبارت در ذخیره ایمنی مرحله‌ی ۱ خواهد بود: x_{T+l_1} و y_{nT} که میزان تقاضای خالص را در دوره‌های $T+l_1$ و nT نشان می‌دهند. میزان کمبود در مرحله‌ی ۲ به‌صورت $y_{nT}-s_2$ است و چون هرگونه کمبود در این مرحله، در مرحله‌ی ۱ انعکاس می‌یابد، این کمبود به‌صورت $s_1-(y_{nT}-s_2)$ یا $s_1+s_2-y_{nT}$ خواهد بود. بنابراین:

$$\int_{y_{nT}=\infty}^{y_{nT}=s_2}[\int_{X_{T+l_1}}^{x_{T+l_1}}(S_1-x_{T+l_1})f_1(x_{T+l_1})dx_{T+l_1}]f_2(y_{nT})dy_{nT}$$
$$+\int_{y_{nT}=s_2}^{y_{nT}=\infty}[\int_{X_{T+l_1}=-\infty}^{x_{T+l_1}=s_1+s_2-y_{nt}}(s_1+s_2-y_{nT}-x_{T+l_1})f_1(x_{T+l_1})$$
$$dx_{T+l_1}]f_2(y_{nT})dy_{nT}$$

عبارت بالا را نمی‌توان به‌صورت یک فرم ساده شده نوشت. از این‌رو تقریبی را برای جایگزین‌کردن میزان کمبود واقعی مرحله‌ی ۲ با میزان کمبود مورد انتظار به کار می‌بریم که عبارت است از:

$$\frac{\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nT}\{\varphi(k_2)-k_2+k_2\phi(k_2)\}}{1-\phi(k_2)}$$

و به‌اختصار:

$$\phi(k_2)[k_1\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{T+l_1}]$$
$$+(1-\phi(k_2))[k\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{T+l_1}]$$

که در آن k عبارت است از:

$$k=k_1-\sqrt{\frac{nT}{T+l_1}}\frac{\varphi(k_2)-k_2+k_2\phi(k_2)}{1-\phi(k_2)}$$

خطای ناشی از این تقریب قابل چشم‌پوشی است.[۱۶] میزان کمبود مورد انتظار دوره‌ی پایانی عبارت است از:

$$\int_{y_{nT}=-\infty}^{y_{nT}=s_2}[\int_{X_{T+l_1}}^{x_{T+l_1}}(S_1-x_{T+l_1})f_1(x_{T+l_1})dx_{T+l_1}]f_2(y_{nT})dy_{nT}$$
$$+\int_{y_{nT}=s_2}^{y_{nT}=\infty}[\int_{x_{T+l_1}=-\infty}^{x_{T+l_1}=s_1+s_2-y_{nT}}(s_1+s_2-y_{nT}-x_{T+l_1})$$
$$f_1(x_{T+l_1})dx_{T+l_1}]f_2(y_{nT})dy_{nT}\approx\phi(k_2)k_1\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}$$
$$\sqrt{T+l_1}+(1-\phi(k_2))[k\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{T+l_1}$$
$$(\varphi(k)-k+k\phi(k))]$$

و برای هزینه‌ی کل خواهیم داشت (مدل ۲):

$$\begin{aligned}ETC =&\frac{A_1}{T}+\frac{A_2}{nT}+\frac{A_3}{mnT}+\frac{A_4}{T}\\&+\frac{1}{2}\mu Th_1+\frac{1}{2}(n-1)(1-r)\mu Th_2\\&+\frac{1}{2}n(1-r)(m-1)\mu Th_3+\frac{1}{2}\mu Th_4\\&+\frac{n-1}{n}[\frac{P_1}{T}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{T+l_1}\\&\{\varphi(k_1)-k_1+k_1\phi(k_1)\}+h_1k_1\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\\&+\sqrt{T+l_1}]\frac{1}{n}[\phi(k_2)(\frac{P_1}{T}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{T+l_1}\\&+\{\varphi(k_1)-k_1+k_1\phi(k_1)\}(1-\phi(k_2)\\&(\frac{kp_1}{T}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{T+l_1}\{\varphi(k)-k+k\phi(k)\})]\\&h_2(k_2\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nT}+\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\\&\sqrt{nT}\{\varphi(k_2)-k_2+k_2\phi(k_2)\})+h_3k_3\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\\&\sqrt{nmT}+(h_3+\frac{P_3}{nmT})\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{nmT}\\&\{\varphi(k_3)-k_3+k_3\phi(k_3)\}\end{aligned}$$

۲.۲.۳. تقاضا و برگشتی‌ها با سیاست مرور دائم

در این حالت نقطه‌ی سفارش مجدد برای هر مرحله به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شود:[۲۳]

$$ROP_1=(1-r)\mu l_1+k_1\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_1}$$
$$ROP_2=(1-r)\mu l_2+k_2\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_2}$$
$$ROP_3=(1-r)\mu l_3+k_3\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_3}$$

الف) فروش از دست رفته

هزینه‌ی ذخیره‌ی اطمینان مورد انتظار در مرحله‌ی ۱، ۲ و ۳:

$$=h_1\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_1}\{\varphi(k_1)-k_1+k_1\phi(k_1)\}$$
$$=h_2\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_2}\{\varphi(k_2)-k_2+k_2\phi(k_2)\}$$
$$=h_3\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_3}\{\varphi(k_3)-k_3+k_3\phi(k_3)\}$$

هزینه‌ی کمبود مورد انتظار در مرحله‌ی ۱، ۲ و ۳:

$$=\frac{P_1}{T}\int_{ROP_1}^{\infty}(x_{l_1}-ROP_1)f(x_{l_1})dx_{l_1}=\frac{P_1}{T}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_1}\{\varphi(k_1)-k_1+k_1\phi(k_1)\}$$
$$=\frac{P_2}{nT}\int_{ROP_2}^{\infty}(x_{l_2}-ROP_2)f(x_{l_2})dx_{l_2}=\frac{P_2}{nT}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_2}\{\varphi(k_2)-k_2+k_2\phi(k_2)\}$$
$$=\frac{P_3}{nmT}\int_{ROP_3}^{\infty}(x_{l_3}-ROP_3)f(x_{l_3})dx_{l_3}=\frac{P_3}{nmT}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_3}\{\varphi(k_3)-k_3+k_3\phi(k_3)\}$$

لذا، هزینه‌ی کل (ETC) چنین به دست می‌آید (مدل ۳):

$$\begin{aligned}ETC =&\frac{A_1}{T}+\frac{A_2}{nT}+\frac{A_3}{mnT}+\frac{A_4}{T}+\frac{1}{2}\mu Th_1\\&+\frac{1}{2}(n-1)(1-r)\mu Th_2+\frac{1}{2}n(1-r)(m-1)\mu Th_3\\&+\frac{1}{2}\mu Th_4+(h_1+\frac{P_1}{T})\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_1}\{\varphi(k_1)\\&-k_1+k_1\phi(k_1)\}+(h_2+\frac{P_2}{nT})\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_2}\\&+\{\varphi(k_2)-k_2+k_2\phi(k_2)\}(h_3+\frac{P_3}{nmT})\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\\&\sqrt{l_3}\{\varphi(k_3)-k_3+k_3\phi(k_3)\}\end{aligned}$$

ب) تخصیص

توضیحات همانند مطالب ارائه‌شده در بخش ۱، ۲ و ۳ است. در نتیجه ذخیره‌ی اطمینان عبارت است از:

$$\frac{1}{n}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_1+l_2}+\frac{n-1}{n}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_1}$$

کمبود در مرحله‌ی ۱ عبارت است از:

$$\begin{aligned}&\frac{1}{n}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_1+l_2}\{\varphi(k_1)-k_1+k_1\phi(k_1)\}\\&+\frac{n-1}{n}\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_1}\{\varphi(k_1)-k_1+k_1\phi(k_1)\}\end{aligned}$$

کل هزینه عبارت است از (مدل ۴):

$$\begin{aligned}ETC =&\frac{A_1}{T}+\frac{A_2}{nT}+\frac{A_3}{mnT}+\frac{A_4}{T}+\frac{1}{2}\mu Th_1\\&+\frac{1}{2}(n-1)(1-r)\mu Th_2+\frac{1}{2}n(1-r)(m-1)\mu Th_3\\&+\frac{1}{2}\mu Th_4+\frac{n-1}{n}(h_1+\frac{P_1}{T})\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_1}\\&+\{\varphi(k_1)-k_1+k_1\phi(k_1)\}\frac{1}{n}(h_1+\frac{P_1}{T})\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\\&\sqrt{l_1+l_2}\{\varphi(k_1)-k_1+k_1\phi(k_1)\}h_2\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\\&\sqrt{l_2}\{\varphi(k_2)-k_2+k_2\phi(k_2)\}+(h_3+\frac{P_3}{nmT})\\&\sqrt{(1-r)^2\sigma^2+\delta^2}\sqrt{l_3}\{\varphi(k_3)-k_3+k_3\phi(k_3)\}\end{aligned}$$

۴. مثال‌های عددی و تحلیل نتایج

در این قسمت مدل‌های به دست آمده با مثال‌های عددی، با استفاده از جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب حل و تحلیل می‌شود.

با توجه به غیر خطی بودن تابع هزینه‌ی به دست آمده، و چون روش منحصر به فردی برای حل مسائل بهینه‌سازی با توابع غیر خطی وجود ندارد، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری از قبیل الگوریتم ژنتیک مفید به نظر می‌رسد. الگوریتم ژنتیک یک تکنیک بهینه‌سازی است و در مسائلی کاربرد دارد که روش‌های ریاضی دقیق و بهینه برای حل آنها وجود ندارد.

این الگوریتم مبتنی بر نظریه‌ی تکامل داروین است. چهار فرایند اصلی در الگوریتم ژنتیک عبارت‌اند از: ایجاد جمعیت کروموزوم‌ها (تبدیل مجموعه‌یی از پاسخ‌های ممکن به شکل کروموزوم و ژن)، انتخاب، ترکیب و جهش. در الگوریتم

ژنتیک به‌عنوان اولین مرحله لازم است مجموعه‌یی از جواب‌های شدنی به‌عنوان جمعیت اولیه ایجاد شود. اعضای این مجموعه معمولاً به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. تعداد اعضای جمعیت به نوع مسئله بستگی دارد. در واقع تعداد اعضا، پارامتری است که با تغییر آن می‌توان دقت جواب‌ها و سرعت هم‌گرایی جست‌وجو را بهبود بخشید.

براساس تجربه بهتر است تعداد اعضای جمعیت عددی بین ۱۰ تا ۱۶۰ باشد. بعد از انتخاب جمعیت، لازم است اعضای آن به شکل کروموزوم درآیند. هر کروموزوم آرایشی از چند ژن است. در مرحله‌ی تبدیل (کدگذاری[۱۰])، جواب‌ها به ژن‌ها تبدیل می‌شوند. روش‌های مختلفی برای کدگذاری وجود دارد. انتخاب روش وابسته به نوع مسئله‌یی است که به آن پرداخته می‌شود. مهم‌ترین نوع کدگذاری، کدگذاری باینری است. ارزش تناسب به‌ازای هرکدام از اعضای جمعیت با استفاده از تابع برازش (در اینجا تابع هزینه) اندازه‌گیری می‌شود.

گام بعدی ایجاد دومین جمعیت از جامعه، براساس فرایندهای انتخاب است. روش‌های مختلفی از قبیل نخبه‌گزینی یا انتخاب چرخان برای الگوریتم‌های ژنتیک وجود دارد که می‌توان برای انتخاب ژن‌ها از آن‌ها استفاده کرد. وقتی کروموزوم‌ها انتخاب شدند، باید به‌طور تصادفی برای افزایش تناسب اصلاح شوند. دو راه حل اساسی برای این کار وجود دارد. اولین و ساده‌ترین راه «جهش» است که طی آن، تغییری کوچک در یک نقطه از کد خصوصیات ایجاد می‌شود. دومین روش «ترکیب» نام دارد که براساس فرایند ترکیب کروموزوم‌ها در طول تولید مثل در موجودات زنده شبیه‌سازی شده است. این فرایند آن‌قدر تکرار می‌شود تا به آخرین مرحله برسیم.

در این نوشتار تعداد اعضای جمعیت برابر با ۱۰۰، احتمال رخداد ترکیب ۸۰ درصد، و احتمال رخداد جهش ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن مقادیر زیر، تأثیر تغییر پارامترها در چهار مدل بررسی می‌شود.

$$\mu = ۱۰۰, \quad \sigma = ۱, ۵, ۱۰, \quad \delta = ۱, ۲, ۳$$

$$r = ۰/۱, ۰/۱۵, ۰/۲, ۰/۳, ۰/۵$$

$$A_1 = ۲۵, \quad A_2 = ۱۰۰, \quad A_3 = ۵۰, \quad A_4 = ۲۵$$

$$h_1 = ۲, \quad h_2 = ۱, \quad h_3 = ۲, \quad h_4 = ۰/۵$$

$$p_1 = ۱۰, ۲۰, \quad p_2 = ۲۰, \quad p_3 = ۱۵$$

$$l_1 = ۰/۲۵, \quad l_2 = ۰/۵, \quad l_3 = ۰/۵$$

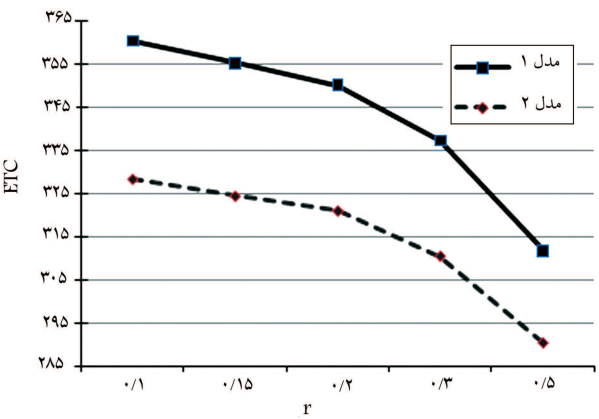
برای تمام ۶۰ مثالی که به‌ازای هریک از مدل‌ها بررسی می‌شود، مقادیر n، m و T با حل مدل قطعی به دست می‌آید و سپس با جایگذاری این مقادیر در مدل‌های تصادفی، هزینه‌ی کمینه‌ی هر معادله و مقادیر k_1، k_2 و k_3 محاسبه می‌شود. برای مثال، به‌ازای مقادیر $\sigma = ۱$، $\delta = ۱$، $r = ۰/۱$، $p_1 = ۱۰$ مقدار متغیرها به‌ازای هریک از مدل‌ها آمده است (جدول ۱).

از جداول ۲ الی ۵ و همچنین شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان نتیجه گرفت که هزینه‌ی کل با افزایش نرخ بازگشتی‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به این که به‌ازای مقادیر ۰/۱ و ۰/۱۵ برای نرخ بازگشتی مقدار n برابر ۲، و برای مقادیر ۰/۲ و ۰/۳ مقدار n برابر ۳، و به‌ازای نرخ بازگشتی ۰/۵ مقدار n برابر ۴ به دست می‌آید، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نرخ بازگشتی مقدار n نیز افزایش یافته است.

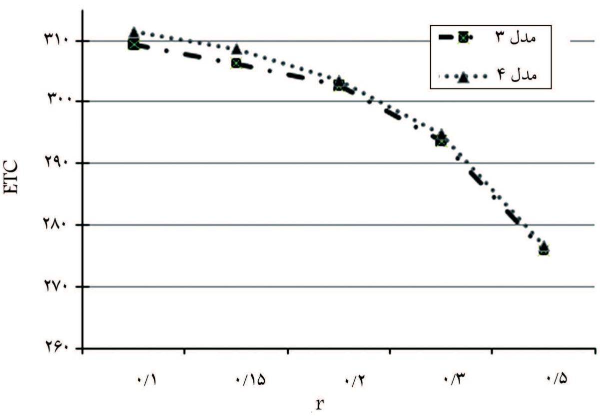
همچنین در تمام جداول ۲ الی ۵ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش δ میزان هزینه افزایش یافته است (شکل‌های ۵ و ۶). با افزایش مقدار p_1 نیز هزینه در جداول ۲ و ۳ افزایش یافته امّا در جدول ۴ و ۵ تغییر چندانی در هزینه ایجاد نشده است. در تمامی جداول با افزایش مقدار σ هزینه‌ی کل نیز افزایش یافته است (شکل ۷ و ۸).

جدول ۱. مقادیر متغیرها به‌ازای $P_1 = ۱۰, r = ۰/۱, \delta = ۱, \sigma = ۱$.

	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴
n	۱	۱	۱	۱
M	۲	۲	۲	۲
T	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹
k_1	۱/۰۰	۰/۹۴	۷/۶۷	۸/۰۴
k_2	۱/۴۵	۰	۸/۹۷	۳/۶۰
k_3	۱/۶۳	۰/۹۳	۷/۵۷	۷/۷۱
ETC	۳۰۸/۴۷۴	۳۰۰/۶۸۹	۲۹۶/۴۶۸	۲۹۶/۹۶۱



شکل ۳. نمودار تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به تغییرات نرخ بازگشتی (مرور دوره‌یی).



شکل ۴. نمودار تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به تغییرات نرخ بازگشتی (مرور دایم).

چنان که در جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود هزینه به‌ازای پارامترهای یکسان در حالت فروش از دست رفته بیشتر از حالت تخصیص است. البته چنانچه هزینه‌ی کمبود در مرحله‌ی ۱ بسیار بزرگ‌تر از هزینه‌ی فروش از دست رفته در مرحله‌ی ۲ باشد، ممکن است فروش از دست رفته اقتصادی‌تر باشد.[۱۷] به‌منظور بررسی معنی‌داری این تفاوت هزینه‌ها از آزمون میانگین مشاهدات زوجی استفاده می‌شود. این آزمون نشان داد که در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($t_{۰/۹۵} = ۱/۶۶$) هزینه‌های این دو حالت تفاوت معنی‌داری با هم دارند ($t = ۱۷/۹۱$).

در جداول ۴ و ۵ به‌ازای پارامترهای یکسان، هزینه‌ی فروش از دست رفته کم‌تر از حالت تخصیص، ولی این تفاوت هزینه نسبت به سیستم مروردوره‌یی کم‌تر است. آزمون آماری در این مورد نشان داد که در اینجا هزینه‌ها تفاوت معنی‌داری باهم ندارند ($t = -۱۲/۷۱$).

جدول ۲. مقدار ETC مدل ۱ به‌ازای مقادیر متفاوت r, σ, δ, P_1.

R	P_1	$\sigma = 1$			$\sigma = 5$			$\sigma = 10$		
		$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$	$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$	$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$
۰/۱	۱۰	۳۰۸/۴۷۴	۳۱۸/۷۱۶	۳۲۹/۹۹۸	۳۴۷/۷۸۸	۳۵۱/۶۰۲	۳۵۷/۴۰۵	۴۰۱/۳۲۸	۴۰۱/۳۳۵	۴۰۶/۵۲۸
	۲۰	۳۰۹/۴۸۷	۳۲۰/۳۳۵	۳۳۲/۳۵۹	۳۵۱/۲۶۲	۳۵۵/۲۹۲	۳۶۱/۴۹۱	۴۰۸/۱۶۰	۴۱۰/۳۰۰	۴۱۳/۸۹۴
۰/۱۵	۱۰	۳۰۵/۷۸۳	۳۱۶/۱۵۰	۳۲۷/۵۳۶	۳۴۲/۵۶۵	۳۴۶/۵۳۹	۳۵۲/۶۲۳	۳۹۳/۰۹۸	۳۹۵/۱۵۷	۳۹۸/۵۶۷
	۲۰	۳۰۶/۷۶۶	۳۱۷/۷۷۹	۳۲۹/۷۸۴	۳۴۵/۸۴۹	۳۵۰/۰۸۴	۳۵۶/۶۵۱	۳۹۹/۵۲۵	۴۰۱/۷۵۳	۴۰۵/۴۳۲
۰/۲	۱۰	۳۰۲/۴۵۹	۳۱۳/۲۵۰	۳۲۵/۰۰۸	۳۳۷/۵۹۰	۳۴۱/۹۱۶	۳۴۸/۴۰۹	۳۸۶/۳۰۶	۳۸۸/۵۵۱	۳۹۲/۳۲۴
	۲۰	۳۰۳/۲۹۷	۳۱۴/۷۰۷	۳۲۷/۰۳۲	۳۴۰/۳۰۷	۳۴۴/۸۲۹	۳۵۱/۷۰۱	۳۹۱/۵۶۳	۳۹۳/۹۳۶	۳۹۷/۹۳۹
۰/۳	۱۰	۲۹۴/۷۳۳	۳۰۵/۸۸۵	۳۱۷/۸۰۴	۳۲۴/۷۵۵	۳۲۹/۶۱۳	۳۳۶/۷۷۷	۳۶۷/۳۱۲	۳۶۹/۹۴۰	۳۷۴/۰۷۰
	۲۰	۲۹۵/۵۷۶	۳۰۷/۲۸۶	۳۱۹/۸۹۰	۳۲۷/۲۰۹	۳۳۲/۲۹۳	۳۳۹/۸۸۴	۳۷۲/۰۷۹	۳۷۴/۷۹۸	۳۷۹/۱۸۸
۰/۵	۱۰	۲۷۸/۹۴۱	۲۹۰/۹۶۸	۳۰۳/۴۲۰	۲۹۹/۰۰۷	۳۰۵/۵۲۲	۳۱۴/۴۴۸	۳۲۹/۶۳۷	۳۳۳/۲۶۸	۳۳۸/۹۲۲
	۲۰	۲۷۹/۶۵۴	۲۹۲/۲۵۰	۳۰۵/۳۶۰	۳۰۰/۶۸۵	۳۰۷/۴۸۳	۳۱۶/۸۷۹	۳۳۲/۸۳۶	۳۳۶/۶۶۴	۳۴۲/۶۴۳

جدول ۳. مقدار ETC مدل ۲ به‌ازای مقادیر متفاوت r, σ, δ, P_1.

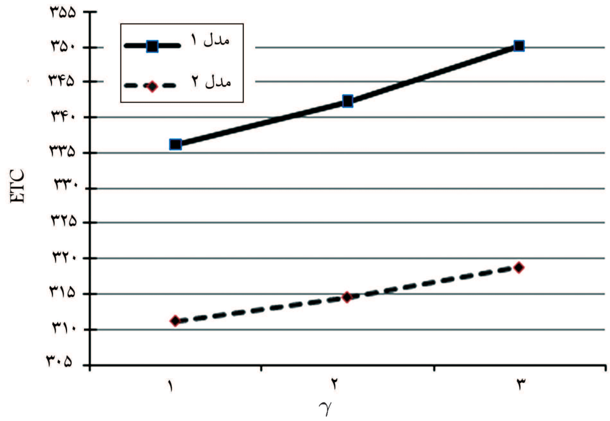
R	P_1	$\sigma = 1$			$\sigma = 5$			$\sigma = 10$		
		$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$	$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$	$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$
۰/۱	۱۰	۳۰۰/۶۸۹	۳۰۵/۹۹۷	۳۱۱/۸۷۰	۳۲۱/۱۱۸	۳۲۳/۱۰۲	۳۲۶/۱۱۵	۳۴۹/۰۱۲	۳۴۹/۹۶۹	۳۵۱/۶۶۶
	۲۰	۳۰۱/۵۳۳	۳۰۷/۴۵۸	۳۱۳/۸۳۳	۳۲۴/۰۶۷	۳۲۶/۱۹۷	۳۲۹/۵۴۳	۳۵۴/۶۱۵	۳۵۶/۱۴۵	۳۵۷/۵۸۵
۰/۱۵	۱۰	۲۹۸/۱۹۴	۳۰۳/۵۸۰	۳۰۹/۴۸۳	۳۱۷/۲۹۶	۳۱۹/۳۶۹	۳۲۲/۵۲۷	۳۴۳/۵۳۰	۳۴۴/۶۱۶	۳۴۶/۳۷۸
	۲۰	۲۹۹/۰۰۷	۳۰۴/۹۳۵	۳۱۱/۴۶۷	۳۲۰/۰۴۵	۳۲۲/۳۱۸	۳۲۵/۷۹۳	۳۴۸/۹۰۴	۳۵۰/۱۰۶	۳۵۲/۰۲۷
۰/۲	۱۰	۲۹۵/۰۶۲	۳۰۰/۸۰۸	۳۰۷/۰۶۴	۳۱۳/۷۶۵	۳۱۶/۰۷۴	۳۱۹/۵۳۲	۳۳۹/۶۸۰	۳۴۰/۸۹۰	۳۴۲/۸۶۱
	۲۰	۲۹۵/۸۰۵	۳۰۲/۰۷۸	۳۰۸/۸۶۹	۳۱۶/۱۵۹	۳۱۸/۶۵۹	۳۲۲/۴۳۵	۳۴۴/۳۷۱	۳۴۵/۷۴۹	۳۴۷/۸۲۸
۰/۳	۱۰	۲۸۷/۳۶۷	۲۹۳/۲۷۷	۲۹۹/۶۰۴	۳۰۳/۲۸۵	۳۰۵/۸۵۸	۳۰۹/۸۲۷	۳۲۵/۸۶۰	۳۲۷/۲۵۰	۳۲۹/۴۴۵
	۲۰	۲۸۸/۰۷۶	۲۹۴/۵۲۵	۳۰۱/۳۹۳	۳۰۵/۴۰۹	۳۰۸/۱۹۹	۳۱۲/۳۴۰	۳۲۹/۹۶۵	۳۳۱/۴۷۳	۳۳۴/۳۳۴
۰/۵	۱۰	۲۷۲/۲۹۴	۲۷۸/۷۲۱	۲۸۵/۳۸۷	۲۸۳/۰۲۹	۲۸۶/۴۷۸	۲۹۱/۲۶۸	۲۹۹/۴۱۹	۳۰۱/۳۵۱	۳۰۴/۳۹۲
	۲۰	۲۷۲/۹۳۳	۲۷۹/۹۴۳	۲۸۷/۱۳۰	۲۸۴/۵۵۴	۲۸۸/۳۳۰	۲۹۳/۵۱۱	۳۰۲/۳۳۱	۳۰۴/۴۴۵	۳۰۷/۷۲۷

جدول ۴. مقدار ETC مدل ۳ به‌ازای مقادیر متفاوت r, σ, δ, P_1.

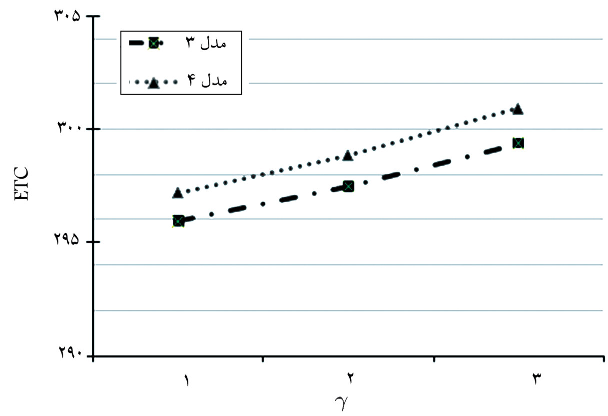
R	P_1	$\sigma = 1$			$\sigma = 5$			$\sigma = 10$		
		$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$	$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$	$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$
۰/۱	۱۰	۲۹۶/۴۶۸	۲۹۹/۱۱۵	۳۰۲/۰۴۵	۳۰۶/۶۵۸	۳۰۷/۶۴۰	۳۰۹/۱۵۰	۳۲۰/۵۳۴	۳۲۱/۰۴۶	۳۲۱/۸۸۱
	۲۰	۲۹۶/۴۶۸	۲۹۹/۱۱۵	۳۰۲/۰۴۵	۳۰۶/۶۵۸	۳۰۷/۶۴۰	۳۰۹/۱۵۰	۳۲۰/۵۳۴	۳۲۱/۰۴۶	۳۲۱/۸۸۱
۰/۱۵	۱۰	۲۹۴/۰۶۶	۲۹۶/۷۵۲	۲۹۹/۷۰۲	۳۰۳/۵۹۰	۳۰۴/۶۳۰	۳۰۶/۲۰۷	۳۱۶/۶۸۳	۳۱۷/۲۲۵	۳۱۸/۱۰۴
	۲۰	۲۹۴/۰۶۶	۲۹۶/۷۵۲	۲۹۹/۷۰۲	۳۰۳/۵۹۰	۳۰۴/۶۳۰	۳۰۶/۲۰۷	۳۱۶/۶۸۳	۳۱۷/۲۲۵	۳۱۸/۱۰۴
۰/۲	۱۰	۲۹۱/۰۸۰	۲۹۳/۸۰۶	۲۹۶/۷۷۴	۲۹۹/۹۵۲	۳۰۱/۰۴۲	۳۰۲/۶۸۹	۳۱۲/۲۴۸	۳۱۲/۸۲۲	۳۱۳/۷۵۱
	۲۰	۲۹۱/۰۸۰	۲۹۳/۸۰۶	۲۹۶/۷۷۴	۲۹۹/۹۵۲	۳۰۱/۰۴۲	۳۰۲/۶۸۹	۳۱۲/۲۴۸	۳۱۲/۸۲۲	۳۱۳/۷۵۱
۰/۳	۱۰	۲۸۳/۳۹۳	۲۸۶/۱۹۷	۲۸۹/۱۹۸	۲۹۰/۹۴۵	۲۹۲/۱۶۵	۲۹۳/۹۷۱	۳۰۱/۶۵۴	۳۰۲/۳۰۶	۳۰۳/۳۵۴
	۲۰	۲۸۳/۳۹۳	۲۸۶/۱۹۷	۲۸۹/۱۹۸	۲۹۰/۹۴۵	۲۹۲/۱۶۵	۲۹۳/۹۷۱	۳۰۱/۶۵۴	۳۰۲/۳۰۶	۳۰۳/۳۵۴
۰/۵	۱۰	۲۶۸/۱۶۶	۲۷۱/۱۱۱	۲۷۴/۱۶۹	۲۷۳/۰۸۰	۲۷۴/۶۶۹	۲۷۶/۸۶۵	۲۸۰/۵۹۲	۲۸۱/۴۸۵	۲۸۲/۸۷۶
	۲۰	۲۶۸/۱۶۶	۲۷۱/۱۱۱	۲۷۴/۱۶۹	۲۷۳/۰۸۰	۲۷۴/۶۶۹	۲۷۶/۸۶۵	۲۸۰/۵۹۲	۲۸۱/۴۸۵	۲۸۲/۸۷۶

جدول ۵. مقدار ETC مدل ۴ به‌ازای مقادیر متفاوت r, σ, δ, P_1.

R	P_1	$\sigma = 1$			$\sigma = 5$			$\sigma = 10$		
		$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$	$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$	$\delta = 1$	$\delta = 2$	$\delta = 3$
۰٫۱	۱۰	۲۹۶٫۹۶۱	۲۹۹٫۹۱۷	۳۰۳٫۱۹۲	۳۰۸٫۳۴۵	۳۰۹٫۴۴۲	۳۱۱٫۱۳۰	۳۲۳٫۸۴۸	۳۲۴٫۴۲۱	۳۲۵٫۳۵۳
	۲۰	۲۹۶٫۹۶۱	۲۹۹٫۹۱۷	۳۰۳٫۱۹۲	۳۰۸٫۳۴۵	۳۰۹٫۴۴۲	۳۱۱٫۱۳۰	۳۲۳٫۸۴۸	۳۲۴٫۴۲۱	۳۲۵٫۳۵۳
۰٫۱۵	۱۰	۲۹۵٫۰۰۵	۲۹۸٫۰۰۷	۳۰۱٫۳۰۲	۳۰۵٫۶۵۴	۳۰۶٫۸۰۹	۳۰۸٫۵۷۰	۳۲۰٫۲۷۵	۳۲۰٫۸۸۰	۳۲۱٫۸۶۳
	۲۰	۲۹۵٫۰۰۵	۲۹۸٫۰۰۷	۳۰۱٫۳۰۲	۳۰۵٫۶۵۴	۳۰۶٫۸۰۹	۳۰۸٫۵۷۰	۳۲۰٫۲۷۵	۳۲۰٫۸۸۰	۳۲۱٫۸۶۳
۰٫۲	۱۰	۲۹۰٫۹۴۶	۲۹۳٫۸۸۵	۲۹۷٫۰۸۵	۳۰۰٫۵۱۱	۳۰۱٫۶۸۶	۳۰۳٫۴۶۲	۳۱۳٫۷۶۸	۳۱۴٫۳۸۷	۳۱۵٫۳۸۹
	۲۰	۲۹۰٫۹۴۶	۲۹۳٫۸۸۵	۲۹۷٫۰۸۵	۳۰۰٫۵۱۱	۳۰۱٫۶۸۶	۳۰۳٫۴۶۲	۳۱۳٫۷۶۸	۳۱۴٫۳۸۷	۳۱۵٫۳۸۹
۰٫۳	۱۰	۲۸۳٫۶۹۱	۲۸۶٫۷۱۴	۲۸۹٫۹۵۰	۲۹۱٫۸۳۳	۲۹۳٫۱۴۹	۲۹۵٫۰۹۶	۳۰۳٫۳۷۹	۳۰۴٫۰۸۳	۳۰۵٫۲۱۲
	۲۰	۲۸۳٫۶۹۱	۲۸۶٫۷۱۴	۲۸۹٫۹۵۰	۲۹۱٫۸۳۳	۲۹۳٫۱۴۹	۲۹۵٫۰۹۶	۳۰۳٫۳۷۹	۳۰۴٫۰۸۳	۳۰۵٫۲۱۲
۰٫۵	۱۰	۲۶۸٫۳۷۰	۲۷۱٫۴۸۸	۲۷۴٫۷۲۶	۲۷۳٫۵۷۳	۲۷۵٫۲۵۵	۲۷۷٫۵۸۰	۲۸۱٫۵۲۵	۲۸۲٫۴۷۰	۲۸۳٫۹۴۳
	۲۰	۲۶۸٫۳۷۰	۲۷۱٫۴۸۸	۲۷۴٫۷۲۶	۲۷۳٫۵۷۳	۲۷۵٫۲۵۵	۲۷۷٫۵۸۰	۲۸۱٫۵۲۵	۲۸۲٫۴۷۰	۲۸۳٫۹۴۳



شکل ۵. نمودار تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به تغییرات انحراف استاندارد خطای تصادفی (مرور دوره‌یی).



شکل ۶. نمودار تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به تغییرات انحراف استاندارد خطای تصادفی (مرور دایم).

جدول ۶. مقایسه هزینه‌ی سیستم مرور دائم و دوره‌یی با تغییر هزینه‌ی نگه‌داری.

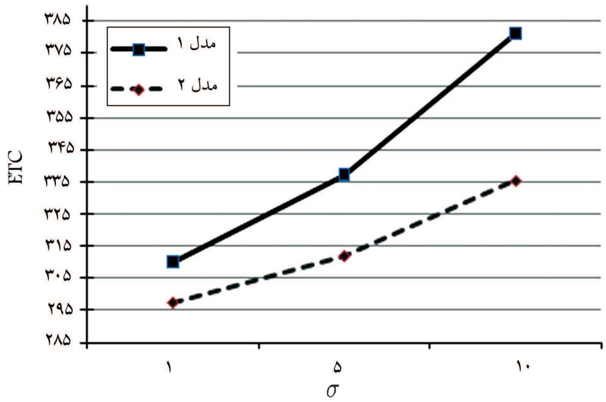
مقادیر h_1, h_2, h_3, h_4	۲، ۱، ۲، ۰٫۵	۲۰، ۱۰، ۲۰، ۵	۱۰۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵
مدل ۱	۳۰۸٫۴۷۴	۱۵۵۹٫۲۶	۷۰۵۷٫۷۵
مدل ۲	۳۰۰٫۶۸۹	۱۵۳۲٫۴۱	۶۹۷۱٫۲۶
مدل ۳	۲۹۶٫۴۶۸	۱۵۴۶٫۲۲	۷۰۹۹٫۷۱
مدل ۴	۲۹۶٫۴۶۸	۱۵۵۱٫۱۴	۷۱۸۴٫۴۱

جدول ۷. مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید.

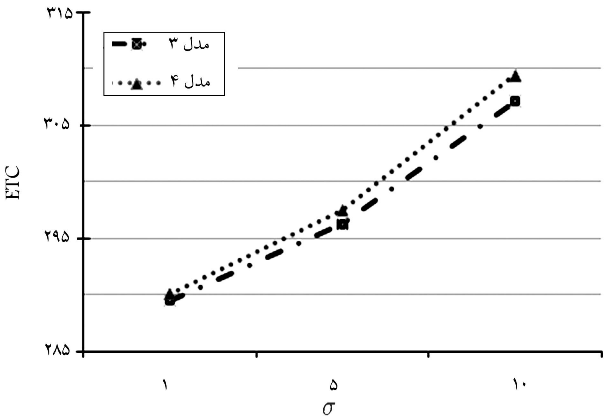
	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴
الگوریتم ژنتیک	۳۰۸٫۴۷۴	۳۰۰٫۶۸۹	۲۹۶٫۴۶۸	۲۹۶٫۹۶۱
شبیه‌سازی تبرید	۳۰۸٫۵۵۱	۳۰۰٫۷۴۴	۲۹۶٫۶۷۷	۲۹۷٫۱۶۰
میزان بهبود	۰٫۰۷۷	۰٫۰۵۵	۰٫۲۰۹	۰٫۱۹۹

با مقایسه جداول ۲ الی ۵ نکته دیگری که مشاهده می‌شود این است که هزینه‌ی سیستم مروردائم با پارامترهای یکسان کم‌تر از سیستم مرور دوره‌یی است. به‌منظور بررسی معنی‌داری این تفاوت، از آزمون میانگین در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($t_{0,95} = ۱٫۶۶$) استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو حالت فروش از دست رفته ($t = ۱۷٫۹۶$) و تخصیص ($t = ۱۷٫۹۳$) تفاوت معنی‌داری بین هزینه‌ها وجود دارد. اما در صورتی که هزینه‌های نگه‌داری افزایش یابد، هزینه‌ی سیستم مروردائم بزرگ‌تر از هزینه‌ی سیستم مرور دوره‌یی خواهد شد (جدول ۶).

همچنین مقدار تابع هدف و مقادیر k_1، k_2، و k_3 با استفاده از جعبه‌ابزار الگوریتم شبیه‌سازی تبرید[11] در نرم‌افزار متلب به دست آمده و خروجی آن در جدول ۷، به‌منظور مقایسه با خروجی الگوریتم ژنتیک، آورده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مقدار بهتری را به دست آورده است.



شکل ۷. نمودار تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به تغییرات انحراف استاندارد (مرور دوره‌یی).



شکل ۸. نمودار تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به تغییرات انحراف استاندارد (مرور دایم).

۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار مدل‌های قطعی و تصادفی را برای یک سیستم موجودی در دو حالت مروردائم و مروردوره‌یی بررسی کردیم. یکپارچگی بازگشتی‌ها با زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، تحلیل آن را برای سیستم‌های بزرگ‌تر پیچیده می‌سازد. درنتیجه به‌منظور سهولت، در این مقاله فرض‌هایی را در نظر گرفتیم تا بتوان مدل را حل کرد. نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها عبارت‌اند از:

۱. مقایسه‌ی هزینه‌ی حالت فروش از دست رفته و تخصیص نشان داد که حالت تخصیص ــ نسبت به حالت فروش از دست رفته ــ هزینه‌ی کم‌تری در سیستم مرور دوره‌یی دارد.

۲. بسته به میزان هزینه‌های نگه‌داری و آماده‌سازی، هزینه‌ی دو سیستم مرور دائم و مرور دوره‌یی ممکن است کم‌تر یا بیشتر از دیگری باشد.

۳. وقتی که نرخ بازگشتی افزایش می‌یابد، همبستگی بین تقاضا و بازگشتی بیشتر می‌شود و درنتیجه تغییرپذیری تقاضای خالص کاهش می‌یابد. در هر حال با توجه به سایر پارامترهای تأثیرگذار نمی‌توان نتیجه گرفت که افزایش این همبستگی باعث کاهش میزان هزینه‌ها می‌شود یا خیر.

مدیران هنگام در نظر گرفتن سیستم موجودی با بازگشتی‌ها باید به‌شدت به تحلیل پارامترها و هزینه‌های خود پرداخته و درمورد میزان موجودی و سیستم تصمیم بگیرند. لازم به ذکر است نمی‌توان به‌طور قطع نتیجه گرفت که با افزایش نرخ بازگشتی‌ها هزینه‌ها نیز افزایش یا کاهش یابند.

با توجه به این که در این نوشتار توزیع تقاضا نرمال در نظر گرفته شده است، در تحقیقات آتی می‌توان به‌منظور توسعه‌ی مدل، توزیع‌های دیگری از قبیل توزیع گاما و پواسون را مورد بررسی قرار داد. از طرفی تقاضا و بازگشتی‌ها در دوره‌های متفاوت مستقل‌اند اما می‌توان در دوره‌های مختلف آنها را همبسته فرض کرد.

پانوشت‌ها

1. repair
2. refurbishing
3. remanufacturing
4. cannibalization
5. recycling
6. safety factor
7. order up to level
8. emergency shipment
9. allocation
10. encoding
11. simulated annealing

منابع (References)

1. Akcali, E. and Cetinkaya, S. "Quantitative models for inventory and production planning in closed-loop supply chains", *International Journal of Production Research*, **49**(8), pp. 2373-2407 (2011).
2. Alamri, A.A. "Theory and methodology on the global optimal solution to a general reverse logistics inventory model for deteriorating items and time varying rates", *Computers & Industrial Engineering*, **60**(2), pp. 236-24 (2011).
3. Chan, H.K., Yin, S. and Chan, F.T.S. "Implementing just-in-time philosophy to reverse logistics systems: A review", *International Journal of Production Research*, **48**(21), pp. 6293-6313 (2010).
4. Muckstadt, J.A. and Isaac, M.H. "An analysis of single item inventory systems with returns", *Naval Research Logistics Quarterly*, **28**, pp. 237-254 (1981).
5. Ravi, V., Ravi, S. and Tiwari, M.K. "Analyzing alternatives in reverse logistics for end-of-life computers: ANP and balanced scorecard approach", *Computers & Industrial Engineering*, **48**(2), pp. 327-356 (2005).
6. Rubio, S., Chamorro, A. and Miranda, F.J. "Characteristics of the research on reverse logistics (1995–2005)",

International Journal of Production Research, **46**(4), pp. 1099-1120 (2008).

7. Mutha, A. and Pokharel, S. "Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules", *Computers & Industrial Engineering*, **56**(1), pp. 334-346 (2009).

8. Nagel, C. and Meyer, P. "Caught between ecology and economy: End-of-life aspects of environmentally conscious manufacturing", *Computers & Industrial Engineering*, **36**(4), pp. 781-792 (1999).

9. Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J. and Van Wassenhove, L.N. "Strategic issues in product recovery management", *California Management Review,* **37**(2), pp. 114-128 (1995).

10. Guide Jr, V.D.R., Jayaraman, V., Srivastava, R. and Benton, W.C. "Supply chain management for recoverable manufacturing systems", *Interfaces,* **30**, pp. 125-145 (2000).

11. Yuan, K.F. and Gao, Y. "Inventory decision-making models for a closed-loop supply chain system", *International Journal of Production Research*, **48**(20), pp. 6155-6187 (2010).

12. Korugan, A. and Gupta, S.M. "A multi-echelon inventory system with returns", *Computers and Industrial Engineering*, **35**, pp. 145-148 (1998).

13. Minner, S. "Strategic safety stocks in reverse logistics supply chains", *International Journal of Production Economics*, **71**, pp. 417-428 (2001).

14. DeCroix, G.A. "Optimal policy for a multiechelon inventory system with remanufacturing", *Operations Research*, **54**(3), pp. 532-543 (2006).

15. Mitra, S. "Analysis of a two-echelon inventory system with returns", *Omega*, **37**, pp. 106-115 (2009).

16. Mitra, S. and Chatterjee, A.K. "Leveraging information in multi-echelon inventory systems", *European Journal of Operational Research*, **152**, pp. 263-280 (2004).

17. Mitra, S. "Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns", *Computer & Industrial Engineering,* bf 62, pp.870-879 (2011).

18. Khouja, M. "Optimizing inventory decisions in a multi-stage multi-customer supply chain", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **39**(3), pp. 193-208 (2003).

19. Munson, C. and Rosenblatt, M. "Coordinating a three-level supply chain with quantity discounts", *IIE Transactions,* **33**, pp. 371-384 (2001).

20. Jaber, M. and Goyal, S. "Coordinating a three-level supply chain with multiple suppliers, a vendor and multiple buyers", *International Journal of Production Economics*, **116**(1), pp. 95-103 (2008).

21. Lee, J. and Moon, I. "Coordinated inventory models with compensation policy in a three level supply chain", *Lecture Notes in Computer Science*, **3982**, pp. 600-609 (2006).

22. Jaber, M.Y., Bonney, M. and Guiffrida, A.L. "Coordinating a three-level supply chain with learning-based continuous improvement", *International Journal of Production Economics*, **127**(1), pp. 27-38 (2010).

23. Mitra, S. "Analysis of a two-echelon inventory system with returns", *omega*, **37**, pp. 106-115 (2006).