مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۱ - ۳۱، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۵۱-۶۰

Original Article

برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته با تقاضای قطعی پویا و قیمت پیوسته‌ی نزولی

حمیدرضا کمالی * **(دانشجوی دکتری)**
احمد صادقیه (استاد)
محمدعلی وحدت‌زاد (استادیار)
حسن خادمی‌زارع (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

در این نوشتار زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته با لحاظ انواع هزینه‌ها و نیز محدودیت‌های ظرفیت و زمان، برای محصول‌های تکنولوژیک که هزینه‌ی تولید و قیمت فروش آنها نزولی است، به‌منظور تعیین مقدار و زمان سفارش‌دهی، تولید و تحویل برنامه‌ریزی می‌شود. بدین‌منظور از چهار روش متاهیوریستیک الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی انبوه ذرات، تکامل تفاضلی و کولونی زنبورهای مصنوعی به‌همراه برخی تغییرات در حل مسئله استفاده شده و جواب آنها برای مسائل با ابعاد کوچک با جواب بهینه‌ی حاصل از حل مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح مسئله مقایسه شده است. نتایج حاصل از تحلیل عددی برای مسئله‌ی با ابعاد کوچک و نیز با ابعاد بزرگ نشان می‌دهد که خطای روش تکامل تفاضلی قابل قبول است و نیز کم‌ترین خطا در بین چهار روش ذکر شده است.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، قیمت پیوسته‌ی نزولی، الگوریتم متاهیوریستیک.

hrkamali@gmail.com
sadegheih@yazd.ac.ir
mvahdat@yazd.ac.ir
hkhademiz@yazd.ac.ir

۱. مقدمه

زنجیره‌ی تأمین حاصل به هم پیوستن حلقه‌های عملیاتی مختلفی است که در ابتدای آن عرضه‌کنندگان و در انتهای آن مشتریان قرار دارند. زنجیره‌ی تأمین به جریان مواد، اطلاعات، وجوه و خدمات ــ از تأمین‌کنندگان مواد خام طی کارگاه‌ها و انبارها تا مشتریان پایانی ــ اشاره دارد و سازمان‌ها و فرایندهایی را شامل می‌شود که محصولات، اطلاعات و خدمات را تولید و به مصرف‌کنندگان تحویل می‌دهند. زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته زنجیره‌ی تأمینی است که علاوه بر اجزای پیشین، دارای بخش‌هایی برای جمع‌آوری محصولات بازگشتی، بازیافت آنها و استفاده‌ی مجدد از آنها در تولید محصول مورد نظر باشد. امروزه مبحث مدیریت زنجیره‌ی تأمین از جمله مباحثی است که در حوزه‌ی مدیریت صنایع مختلف مطرح شده و به‌علت تمایل شدید صنایع به کاهش هزینه‌ها، برقراری تعامل روزافزون بین تولیدکنندگان محصولات در سطوح مختلف، و ایجاد روزافزون زنجیره‌های تأمین برای کالاهای مختلف بسیار مورد توجه واقع شده است.

محصولات تکنولوژیک[1] محصولاتی هستند که براساس تکنولوژی بالا تولید می‌شوند و به‌علت رشد سریع تکنولوژی و وجود رقابت بین صاحبان این نوع صنایع، چرخه‌ی عمرشان نسبتاً کوتاه است و به‌سرعت منسوخ می‌شود. به‌همین دلیل هزینه‌ی قطعات اولیه و قیمت فروش این محصولات با گذشت زمان رو به کاهش است. به‌طور مثال در برخی صنایع مانند صنایع رایانه‌یی و ارتباطی، هزینه‌ی ساخت و نیز قیمت فروش محصولات معادل ۱٪ در هفته کاهش داشته است.[1] بنابراین هرچه این محصولات سریع‌تر توزیع شوند درآمد بیشتری حاصل می‌شود. با توجه به این موضوع و با در نظر داشتن سرعت محدود تولید و هزینه‌های ثابت حمل و تحویل کالا نیاز به مدیریت و برنامه‌ریزی تولید محصولات تکنولوژیک بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

در این نوشتار برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته برای محصولات تکنولوژیک که از دو دیدگاه «برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته» و «برنامه‌ریزی محصولات تکنولوژیک» نوآورانه است مورد بحث قرار گرفته است. برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته و بهینه‌سازی آن موضوعی است که مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در هریک از این تحقیقات، برنامه‌ریزی در شرایطی خاص انجام گرفته است. در جدول ۱ تحقیقات اخیر در این رابطه دسته‌بندی شده است.

چنان که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تحقیق جاری دارای پنج فرضیه (تحویل دسته‌یی، لحاظ زمان‌ها، تقاضای پویا، بازارهای چندگانه، لحاظ هزینه‌های سفارش‌دهی، نگه‌داری و کمبود) است که این فرضیات در مطالعات گذشته به‌صورت یک‌جا مورد بررسی قرار نگرفته است. به‌علاوه، توجه به محدودیت حجم محموله‌ها و ظرفیت انبارها در تحقیق جاری سبب نزدیک‌تر شدن مدل به واقعیت شده است.

همچنین برخی محققین، تحقیقاتی در زمینه‌ی برنامه‌ریزی تولید و تحویل

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۰/۴، اصلاحیه ۱۳۹۳/۳/۱۷، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۳۱.

جدول ۱. تحقیقات اخیر در زمینه‌ی برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته.

مرجع	تحویل دسته‌یی	لحاظ زمان‌ها	تقاضای پویا	بازارهای چندگانه	هزینه‌ها (سفارش‌دهی، نگه‌داری، کمبود)
[۲]				√	ک
[۳]					
[۴]					
[۵]		√	√		ن ک
[۶]				√	
[۷]		√	√		ن ک
[۸]	√				س ن ک
[۹]					ن ک
[۱۰]					
[۱۱]					
[۱۲]	√			√	س ن
[۱۳]	√		√		ن
[۱۴]			√		ن
[۱۵]	√		√		ن
تحقیق جاری	√	√	√	√	س ن ک

جدول ۲. تحقیقات اخیر در زمینه‌ی برنامه‌ریزی محصولات تکنولوژیک در یک زنجیره‌ی تأمین.

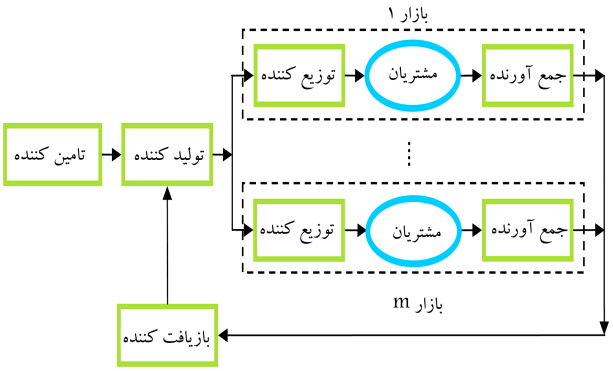
مرجع	تقاضای پویا	مقدار سفارش متفاوت	سیکل سفارش متفاوت	زنجیره‌ی تأمین پیشرو	زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته
[۱]				√	
[۱۶]				√	
[۱۷]		√	√	√	
[۱۸]	√	√	√	√	
[۱۹]				√	
تحقیق جاری	√	√	√		√

کالاهای تکنولوژیک (که قیمت‌شان پیوسته‌ی نزولی است) انجام داده‌اند. بعضی از این تحقیقات در یک سیستم منفرد موجودی و برخی در داخل یک زنجیره‌ی تأمین بوده‌اند. در جدول ۲ تحقیقات انجام‌شده‌ی پیشین در زمینه‌ی برنامه‌ریزی تولید و تحویل کالاهای تکنولوژیک در یک زنجیره‌ی تأمین دسته‌بندی شده است. چنان که مشاهده می‌شود، تحقیق جاری اولین تحقیقی است که در آن برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته برای محصولات با قیمت پیوسته‌ی نزولی انجام شده است.

در بخش دوم این مقاله تعریف مسئله ارائه می‌شود. در بخش سوم اجزای مدل مربوط به آن و در بخش چهارم روش حل مسئله بیان می‌شود. در بخش پنجم با ذکر مثال عددی، کارایی روش حل مسئله بررسی و تأیید شده و نهایتاً در بخش ششم نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. تعریف مسئله

زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته‌ی مورد بررسی شامل یک تأمین‌کننده، یک تولیدکننده، چند بازار فروش بالقوه، و یک بازیافت‌کننده است (شکل ۱). هر بازار فروش بالقوه شامل یک توزیع‌کننده، جمعیت مشتریان و یک جمع‌آورنده است. در ابتدا قطعات



شکل ۱. مدل مفهومی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته‌ی مورد بررسی.

اولیه توسط تأمین‌کننده به تولیدکننده تحویل داده می‌شود و محصولات تولیدی پس از تولید به توزیع‌کننده‌های بازارهای فعال منتقل می‌شود تا به مشتریان فروخته شود. برخی محصولات فروخته شده برگشت داده می‌شود و توسط جمع‌آورنده‌ها خریداری می‌شود. جمع‌آورنده‌ها تعدادی از این محصولات را نابود می‌کنند و تعدادی از آنها را به بازیافت‌کننده تحویل می‌دهند. بازیافت‌کننده نیز بخش‌های قابل بازیافت را پس از بازیابی، برای استفاده‌ی مجدد به تولیدکننده منتقل می‌کند.

در مسئله‌ی مورد بررسی قطعات اولیه به دو دسته تقسیم می‌شود. قطعات دسته‌ی اول هم توسط تأمین‌کننده قابل تهیه است و هم از بازیافت محصول‌های بازگشتی حاصل می‌شود؛ در حالی که قطعات دسته دوم فقط توسط تأمین‌کننده قابل تهیه است و از بازیافت محصولات بازگشتی حاصل نمی‌شود. فرضیات زنجیره‌ی تأمین مورد بررسی عبارت است از:

۱. این زنجیره‌ی تأمین، یک زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته با سه سطح پیشرو و دو سطح معکوس است.

۲. یک محصول مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. افق زمانی مورد مطالعه، محدود و برابر چرخه‌ی عمر محصول است.

۴. تقاضا، قطعی و پویاست.

۵. مواجهه با کمبود مجاز است و کمبود از نوع پس‌افت و هزینه‌ی آن وابسته به زمان است.

۶. نرخ تولید و نرخ بازیافت محدود است.

۷. راه‌اندازی برای تولید یا بازیافت هزینه‌یی ثابت در بر دارد.

۸. تولید و بازیافت به‌صورت پیوسته است ولی تحویل قطعات و محصولات به‌صورت دسته‌یی و در ابتدای هر دوره‌ی زمانی است.

۹. قیمت خرید قطعات اولیه به‌صورت پیوسته نزولی در طول زمان است.

۱۰. هدف، تعیین بازارهای تحت پوشش، تعیین مقدار و زمان سفارش، و تحویل قطعات و محصول به‌منظور بیشینه‌سازی سود زنجیره است.

۱۱. نوع بهینه‌سازی این مسئله از نوع متمرکز با تسهیم منافع است.[۱۲]

۳. اجزای مدل

۱.۳. پارامترهای مدل

پارامترهای مدل عبارت‌اند از:

ρ: افق زمانی مورد مطالعه؛

n: تعداد دوره‌های مورد مطالعه؛

m: تعداد بازارهای بالقوه؛

i: اندیس شماره‌ی دوره؛

k: اندیس شماره‌ی بازار؛

FC^k: هزینه‌ی ثابت پوشش‌دهی بازار kام در کل دوره‌ی زمانی مورد مطالعه؛

BC^k: هزینه‌ی کمبود هر واحد محصول برای توزیع‌کننده‌ی بازار kام در هر دوره‌ی زمانی؛

SP: هزینه‌ی راه‌اندازی عملیات تولید توسط تولیدکننده؛

SR: هزینه‌ی راه‌اندازی برای بازیافت توسط بازیافت‌کننده؛

GP: هزینه‌ی عملیات تولید هر واحد محصول توسط تولیدکننده؛

GS^k: هزینه‌ی عملیات نابودکردن هر واحد محصول بازگشتی توسط جمع‌آورنده‌ی بازار kام؛

GR: هزینه‌ی عملیات بازیافت هر واحد محصول توسط بازیافت‌کننده؛

MP: بیشترین ظرفیت تولید محصول توسط تولیدکننده در هر دوره‌ی زمانی؛

MG^k: بیشترین ظرفیت انتقال محصول هر محموله از تولیدکننده به توزیع‌کننده‌ی بازار kام؛

MH^k: بیشترین ظرفیت انتقال محصول بازگشتی هر محموله از جمع‌آورنده‌ی بازار kام به بازیافت‌کننده؛

MR: بیشترین ظرفیت بازیافت محصول توسط بازیافت‌کننده در هر دوره‌ی زمانی؛

TS: زمان لازم برای خرید قطعات توسط تأمین‌کننده؛

TE: زمان لازم برای انتقال قطعات از تأمین‌کننده به توزیع‌کننده‌ی بازار kام؛

TH^k: زمان لازم برای انتقال محصول بازگشتی از جمع‌آورنده به بازیافت‌کننده‌ی بازار kام؛

TQ: زمان لازم برای انتقال قطعات دسته اول بازیافتی از بازیافت‌کننده به تولیدکننده؛

τ_1^k: نرخ بازگشت محصول در دوره‌ی اول در بازار kام؛

τ_2^k: میزان افزایش نرخ بازگشت محصول در هر دوره نسبت به دوره‌ی قبل در بازار kام؛

D_i^k: تقاضای محصول در دوره‌ی iام در بازار kام؛

P_i^k: قیمت فروش محصول در دوره‌ی iام در بازار kام؛

UB_i, UA_i: هزینه‌ی خرید هر واحد قطعات دسته اول و دوم توسط تأمین‌کننده در دوره‌ی iام؛

UI_i: هزینه‌ی خرید هر واحد محصول بازگشتی توسط جمع‌آورنده در دوره‌ی iام؛

$\Delta^k, \gamma_2^k, \gamma_1^k$: پارامترهای تقاضای محصول؛

RH: نرخ هزینه‌ی نگه‌داری؛

RP: نسبت قیمت خرید محصول بازگشتی به قیمت فروش آن؛

RR: نسبت نرخ بازیافت به نرخ تولید؛

AS_B, AS_A: سود درخواستی تأمین‌کننده برای تحویل هر واحد قطعه‌ی دسته اول و دوم؛

AP: سود درخواستی تولیدکننده به‌ازای هر واحد محصول؛

AD^k: سود درخواستی توزیع‌کننده‌ی بازار kام برای فروش هر واحد محصول.

سایر پارامترها عبارت‌اند از: MA، VQ، VR، VC^k، VD^k، VF، VE، VB، VA، HF، HE، HB، HA، MQ، MF، ME، MB، FE، FB، FA، HP، HR، HC^k، HD^k، HI، CI، CF، CE، CB، CA، FQ، FR، FD^k، FF، CQ، CR، CC^k، CD^k که هریک از آنها دو حرفی است و الگوی توضیح‌شان چنین است:

ـ برای حرف اول: هزینه‌ی ثابت سفارش با F، هزینه‌ی متغیر سفارش هر واحد با V، ظرفیت محموله با M، هزینه‌ی نگه‌داری با H، و ظرفیت انبار با C نشان داده می‌شود.

ـ برای حرف دوم: قطعات دسته اول و دوم خریداری شده توسط تأمین‌کننده به‌ترتیب با A و B، قطعات دسته اول و دوم تولیدکننده به‌ترتیب با E و F، محصولات تولیدکننده با I، محصولات توزیع‌کننده با D، محصولات بازگشتی جمع‌آورنده با C، محصولات بازگشتی بازیافت‌کننده با R، و قطعات بازیافتی بازیافت‌کننده با Q نشان داده می‌شود.

۲.۳. محاسبه‌ی پارامترهای وابسته

پارامترهای هزینه‌ی خرید قطعات، قیمت فروش محصول، قیمت خرید محصولات بازگشتی، مقدار تقاضای محصول، هزینه‌ی نگه‌داری واحد، و ظرفیت بازیافت وابسته به دیگر پارامترهاست و براین اساس محاسبه می‌شود. دراین محاسبات که در ادامه تشریح شده است محدوده‌ی اندیس‌ها به‌صورت $i = 1, ..., n$ و $k = 1, ..., m$ است. قیمت خرید قطعات، قیمت فروش محصول و قیمت خرید محصول بازگشتی روند نزولی براساس زمان دارد و طبق روابط ۱ تا ۴ محاسبه می‌شود.

$$UA_i = \alpha_A - \beta_A (i-1) \quad (1)$$

$$UB_i = \alpha_B - \beta_B (i-1) \quad (2)$$

$$P_i^k = UA_i + AS_A + UB_i + AS_B + GP + AP + AD^k \quad (3)$$

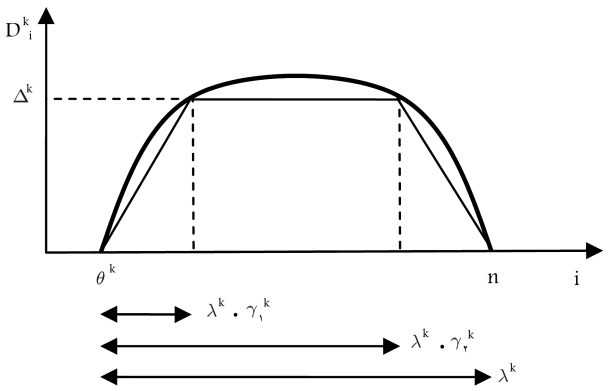
$$UI_i^k = P_i^k \cdot RP \quad (4)$$

برای تعیین تقاضای محصول هر بازار از منحنی چرخه‌ی عمر محصول استفاده می‌شود.[۲۰و۲۱] بدین‌منظور این منحنی به‌شکل یک ذوزنقه (مطابق شکل ۲) تقریب زده شده است. این ذوزنقه دارای سه بخش است: بخش اول افزایشی است و در آن تقاضا رو به افزایش است. در بخش دوم تقاضا ثابت است، و در بخش سوم تقاضا روند کاهشی دارد. مقدار تقاضا طبق روابط ۵ تا ۷ محاسبه می‌شود.

$$\theta^k = 1 + TS + TE + 1 + TG^k \quad (5)$$

$$\lambda^k = n - \theta^k + 1 \quad (6)$$

$$D_i^k = \begin{cases} \frac{\Delta^k (i - \theta^k + 1)}{\lambda^k \cdot \gamma_1^k + 1}, & \theta^k \le i \le \theta^k + \lambda^k \cdot \gamma_1^k \\ \Delta^k, & \theta^k + \lambda^k \cdot \gamma_1^k \le i \le \theta^k + \lambda^k \cdot \gamma_2^k \\ \frac{\Delta^k (n - i + 1)}{\lambda^k (1 - \gamma_2^k)}, & \theta^k + \lambda^k \cdot \gamma_2^k \le i \le n \end{cases} \quad (7)$$



شکل ۲. منحنی چرخه‌ی عمر محصول.

در رابطه‌ی ۵ مقدار θ^k، یعنی شماره‌ی اولین دوره‌یی که فروش محصول در بازار kام شروع می‌شود، معین خواهد شد. این مقدار برابر با ۱ (شماره دوره‌ی شروع برنامه‌ریزی) به‌اضافه‌ی TS (مدت زمان برای تأمین قطعات توسط تأمین‌کننده) به اضافه TE (مدت زمان لازم برای انتقال قطعات از تأمین‌کننده به تولیدکننده) به اضافه‌ی ۱ (کم‌ترین دوره‌ی لازم برای تولید محصول) به‌اضافه‌ی TG^k (مدت زمان لازم برای انتقال محصول از تولیدکننده به توزیع‌کننده‌ی بازار kام) است.

در رابطه‌ی ۶ مقدار λ^k، یعنی تعداد دوره‌هایی که محصول در بازار kام به فروش می‌رسد، تعیین می‌شود. این مدت از θ^k شروع، و به n ختم می‌شود.

تعیین مقدار تقاضا توسط رابطه‌ی ۷، و به‌شکل ذوزنقه‌ی چرخه‌ی عمر محصول (شکل ۲) انجام می‌شود. این تقاضا از مقدار صفر در زمان θ^k شروع می‌شود و به مقدار Δ^k در زمان $\theta^k + \lambda^k \cdot \gamma_1^k$، سپس به مقدار Δ^k در زمان $\theta^k + \lambda^k \cdot \gamma_2^k$ و در نهایت به مقدار صفر در زمان n به‌صورت خط مستقیم تغییر می‌یابد.

هزینه‌ی نگه‌داری واحد برای قطعات اولیه و محصول به‌صورت کسری از ارزش موجودی است و طبق روابط ۸ تا ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$HA_i = RH\frac{\rho}{n}UA_i \quad (۸)$$

$$HB_i = RH\frac{\rho}{n}UB_i \quad (۹)$$

$$HE_i = RH\frac{\rho}{n}UA_i \quad (۱۰)$$

$$HF_i = RH\frac{\rho}{n}UB_i \quad (۱۱)$$

$$HI_i = RH\frac{\rho}{n}(UA_i + UB_i + GP) \quad (۱۲)$$

$$HD_i^k = RH\frac{\rho}{n}(UA_i + UB_i + GP) \quad (۱۳)$$

$$HC_i^k = RH\frac{\rho}{n}UI_i^k \quad (۱۴)$$

$$HR_i = RH\frac{\rho}{m \cdot n}\sum_{k=1}^{m} UI_i^k \quad (۱۵)$$

$$HP_i = RH\frac{\rho}{n}\left(\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} UI_i^k + GR\right) \quad (۱۶)$$

ظرفیت بازیافت نیز طبق رابطه‌ی ۱۷ محاسبه می‌شود.

$$MR = MP \cdot RR \quad (۱۷)$$

۳.۳. متغیرهای مدل

متغیرهای تصمیم حقیقی غیر منفی مدل عبارت‌اند از:

XB_i, XA_i: مقدار خرید قطعات دسته اول و دسته دوم توسط تأمین‌کننده در دوره iام؛

XF_i, XE_i: مقدار انتقال قطعات دسته اول و دسته دوم از تأمین‌کننده به تولیدکننده در دوره iام؛

XP_i: مقدار تولید محصول توسط تولیدکننده در دوره iام؛

XG_i^k: مقدار انتقال محصول از تولیدکننده به توزیع‌کننده‌ی بازار kام در دوره iام؛

XH_i^k: مقدار انتقال محصول بازگشتی از جمع‌آورنده‌ی بازار kام به بازیافت‌کننده در دوره iام؛

XS_i^k: مقدار محصول بازگشتی نابود شده در جمع‌آورنده‌ی بازار kام در دوره iام؛

XR_i: مقدار بازیافت محصول توسط بازیافت‌کننده در دوره iام؛

XQ_i: مقدار انتقال قطعات دسته اول بازیافتی از بازیافت‌کننده به تولیدکننده در دوره iام؛

PB_i, PA_i: سطح موجودی قطعات دسته اول و دسته دوم در تأمین‌کننده در دوره iام؛

PF_i, PE_i: سطح موجودی قطعات دسته اول و دسته دوم در تولیدکننده در دوره iام؛

PI_i: سطح موجودی محصول در نزد تولیدکننده در دوره iام؛

S_i^k: میزان فروش محصول توسط توزیع‌کننده‌ی بازار kام در دوره iام؛

PD_i^k: سطح موجودی محصول در توزیع‌کننده‌ی بازار kام در ابتدای دوره iام؛

PC_i^k: سطح موجودی محصول در جمع‌آورنده‌ی بازار kام در ابتدای دوره iام؛

DC_i^k: میزان محصول بازگشتی به جمع‌آورنده‌ی بازار kام در دوره iام؛

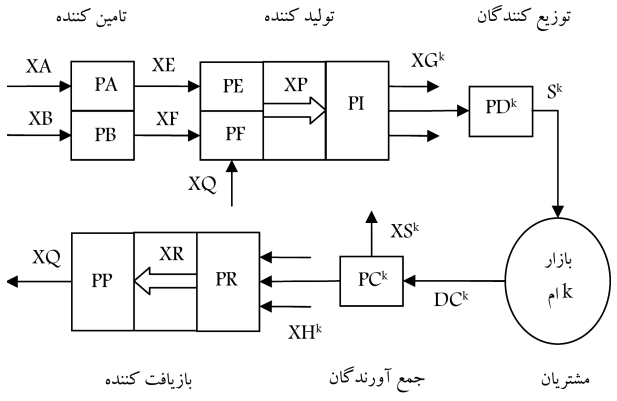
PR_i: سطح موجودی محصول بازگشتی در بازیافت‌کننده در ابتدای دوره iام؛

PP_i: سطح موجودی قطعات دسته اول بازیافت شده در بازیافت‌کننده در ابتدای دوره iام.

همچنین اگر بازار kام تحت پوشش قرارگیرد (فعال باشد)، متغیر باینری WM^k برابر ۱ است و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

۴.۳. ارتباطات بین متغیرهای مدل

در شکل ۳ ارتباطات بین متغیرهای مسئله‌ی مورد بررسی نشان داده شده است. تأمین‌کننده دارای دو ورودی، دو انبار و دو خروجی برای قطعات دسته اول و قطعات دسته دوم است. تولیدکننده نیز دارای سه ورودی برای قطعات دسته اول، قطعات دسته دوم و قطعات دسته اول بازیافتی، دو انبار ابتدایی برای قطعات دسته اول و قطعات دسته دوم، و نیز یک انبار انتهایی برای محصولات و یک خروجی محصول برای هر بازار فعال است. در بخش تولید، یک واحد قطعات اولیه‌ی دسته اول (قطعات جدید یا بازیافتی) و یک واحد قطعات اولیه‌ی دسته دوم به یک واحد محصول تبدیل می‌شود. این عمل در هر دوره به‌اندازه‌ی متغیر تعداد تولید انجام می‌شود. توزیع‌کننده‌ی هر بازار دارای یک ورودی و یک انبار برای محصولات و یک خروجی برای فروش محصول است. جمع‌آورنده‌ی هر بازار دارای یک ورودی و یک انبار برای قطعات بازگشتی و دو خروجی، یکی برای نابودسازی و دیگری برای انتقال به‌منظور بازیافت است. بازیافت‌کننده دارای یک ورودی از هر بازار و یک انبار برای محصولات بازگشتی، و همچنین یک انبار و یک خروجی برای قطعات بازیافتی است. در بخش



شکل ۳. نمودار ارتباطات بین متغیرهای مدل.

بازیافت، یک واحد محصول بازگشتی به یک واحد قطعات دسته اول بازیافتی تبدیل می‌شود. این عمل در هر دوره به اندازه‌ی متغیر تعداد بازیافت انجام می‌گیرد.

همچنین تابع هدف در مسئله‌ی مورد بررسی همان سود زنجیره است که از مقدار درآمد منهای مجموع هزینه‌ها (شامل هزینه‌های عملیات، ثابت و متغیر سفارش‌دهی، نگه‌داری، راه‌اندازی، کمبود، ثابت بازارهای فعال، و خرید) به دست می‌آید.

۴. روش حل مسئله

در مسئله‌ی مورد بررسی ملاحظه می‌شود که میزان تولید محدود است و بازارهای بالقوه هرکدام مقدار معینی تقاضا دارند. همچنین باید تعدادی بازار از بین بازارهای بالقوه‌ی موجود انتخاب شود و تحت پوشش قرار گیرد. این مسئله از نوع مسئله‌ی کوله‌پشتی است که یک مسئله‌ی NP-complete است؛ بنابراین می‌توان اثبات کرد که مسئله‌ی مورد بررسی از دسته مسائل NP-hard است.

هنگام برنامه‌ریزی یک زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته، افق زمانی مورد مطالعه را می‌توان به تعدادی دوره‌ی برابر تقسیم کرد و برنامه‌ریزی را برای آنها انجام داد. مثلاً می‌توان هر دوره را برابر یک فصل، یک ماه، یک هفته، یک روز یا غیره قرار داد. هر چه تعداد تقسیمات (دوره‌ها) بیشتر باشد برنامه‌ریزی نزدیک‌تر به واقعیت صورت می‌گیرد، ولی ابعاد مسئله افزایش یافته و تعداد محاسبات لازم و به تبع آن زمان حل نیز بیشتر می‌شود. مخصوصاً در مسائل NP-hard که با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل شدیداً افزایش می‌یابد. روش‌هایی که جواب بهینه ارائه می‌کنند مانند روش‌های حل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح (MILP)[۲]، با افزایش ابعاد مسئله غیرقابل استفاده می‌شوند؛ لذا در این‌گونه مسائل باید از روش‌های متاهیوریستیک برای تعیین یک راه حل تقریبی و نزدیک به بهینه بهره گرفت.

مدل مورد بررسی یک مدل بزرگ است؛ به‌طور مثال برای مسئله‌ی کوچکی که ۵ دوره زمانی و ۵ بازار دارد تعداد متغیرهای تشکیل‌دهنده‌ی جواب (یا به‌عبارتی تعداد ابعاد مسئله) برابر ۱۱۵ است که مقداری بزرگ به‌شمار می‌رود؛ لذا بهینه‌سازی آن توسط روش‌های متاهیوریستیک هم مشکل است و برای افزایش کارایی این روش‌ها باید تغییراتی در مراحل الگوریتم حل به کار برد. این تغییرات در بخش ایجاد جمعیت اولیه و تصحیح حدود تولید و بازیافت بیان شده است.

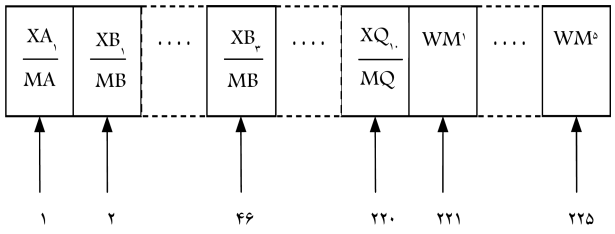
۱.۴. تعریف جواب

هر جواب در مسئله‌ی مورد بررسی به‌صورت رشته‌یی از اعداد حقیقی تعریف می‌شود. با فرض این که n تعداد دوره‌های زمانی مسئله و m تعداد بازارهای بالقوه باشد طول این رشته برابر $(۳m+۷)n+m$ است و هر عضو از آن به‌همراه موقعیت قرارگیری در هر جواب و نیز حد بالای آن طبق جدول ۳ تعریف می‌شود. حدود بالا با توجه به محدودیت ظرفیت انبارها محاسبه شده‌است. حد پایین تمام اعضای هر رشته جواب برابر صفر است و i شماره دوره زمانی و k شماره بازار را مشخص می‌کند.

به‌طور مثال نسبت تعداد قطعات دسته دوم سفارش داده شده توسط تأمین‌کننده به بیشینه ظرفیت سفارش این قطعات در هر محموله در دوره زمانی ۳، چنانچه تعداد دوره‌های مسئله برابر ۱۰ و تعداد بازارها ۵ باشد، به‌صورت یک عدد حقیقی در ۴۶امین محل رشته جواب قرار دارد. در شکل ۴ شمای کلی وضعیت قرارگیری متغیرهای مدل در هر جواب برای این مسئله نشان داده شده است.

جدول ۳. تعریف عناصر تشکیل‌دهنده‌ی هر راه حل.

موقعیت در رشته جواب	حد بالا	مقدار عنصر
$(۳m+۷)(i-۱)+۱$	$(CA+CE)/MA$	XA/MA
$(۳m+۷)(i-۱)+۲$	$(CB+CF)/MB$	XB/MB
$(۳m+۷)(i-۱)+۳$	CE/ME	XE/ME
$(۳m+۷)(i-۱)+۴$	CF/MF	XF/MF
$(۳m+۷)(i-۱)+۵$	۱	XP/MP
$(۳m+۷)(i-۱)+۵+k$	CD^k/MG^k	XG^k/MG^k
$(۳m+۷)(i-۱)+۵+m+k$	CC^k/MH^k	XH^k/MH^k
$(۳m+۷)(i-۱)+۵+۲m+k$	۱	XS^k/CC^k
$(۳m+۷)(i-۱)+۶+۳m$	۱	XR/MR
$(۳m+۷)(i-۱)+۷+۳m$	CQ/MQ	XQ/MQ
$(۳m+۷)n+k$	۱	WM^k



شکل ۴. وضعیت قرارگیری متغیرهای مدل در یک جواب.

۲.۴. ارزیابی جواب

برای به دست آوردن مقدار تابع هدف برای هر جواب باید مقدار سود زنجیره به‌ازای مقادیر آن جواب محاسبه شود. بدین‌منظور باید ابتدا مقادیر متغیرهای مربوط به هر جواب از داخل آن استخراج شود. فرضاً در مسئله‌یی که دارای ۵ بازار است برای به دست آوردن میزان تولید ۴امین دوره باید ۷۱امین مقدار عددی جواب (با توجه به جدول ۳) در مقدار بیشینه ظرفیت تولید در هر دوره (MP) ضرب شود. در حین عملیات تولید جواب‌ها در طی مراحل الگوریتم، ممکن است جواب‌هایی ناموجه ایجاد شود، مثلاً مقدار محصول خارج شده از یک انبار بیشتر از موجودی آن شود. بنابراین باید قبل از ارزیابی هر جواب آن را به‌صورت موجه تبدیل کرد. دستورات مورد استفاده برای این منظور عبارت‌اند از:

۱. اگر هریک از متغیرهای تصمیم از حد پایین خود کم‌تر یا از حد بالای خود بیشتر بود، آنگاه باید آن متغیر برابر حد مربوطه قرار داده شود.

۲. چنانچه مقدار متغیر WM^k بزرگ‌تر از ۰٫۵ بود آن مقدار را باید برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر صفر در نظر گرفت.

۳. اگر میزان ورودی به بخشی از زنجیره به‌گونه‌یی باشد که باعث شود موجودی انبار آن بخش بیش از ظرفیت انبار آن شود باید مقدار ورودی آن‌قدر کاهش یابد تا سطح موجودی انبار با ظرفیت آن برابر شود.

۴. اگر میزان خروجی از بخشی از زنجیره بیش از موجودی آن بخش باشد باید مقدار خروجی آن‌قدر کاهش یابد تا سطح موجودی انبار صفر شود.

۵. در صورت لزوم تغییر میزان خروجی بخش جمع‌آورنده، ابتدا باید مقدار محصول نابود شده تغییر یابد و اگر باز هم تغییر ضرورت داشت مقدار محصول بازگشتی ارسالی به بازیافت‌کننده باید تغییر یابد.

آزمایش‌های عددی انجام شده نشان می‌دهد که موجه کردن هر جواب باید به‌صورت موقت باشد و جواب پس از ارزیابی به فرم قبلی بازگردد. این کار دست‌یابی به جواب‌های بهتر را ساده‌می‌کند، زیرا ضمن حفظ تنوع جواب‌ها، از محدود شدن آنها به بخشی کوچک و افتادن در دام بهینه‌ی محلی جلوگیری می‌کند.

۳.۴. ایجاد جمعیت اولیه

یکی از راه‌های تولید جمعیت اولیه، ایجاد این جمعیت به‌صورت تصادفی با توجه به حدود بالا و پایین متغیرهای جواب است. اما برای دست‌یابی سریع‌تر به جواب نهایی و اجتناب از افتادن در دام بهینه‌ی محلی، جواب اولیه باید با توجه به دستورات زیر تولید شود:

۱. به‌طور تصادفی تعدادی از بازارها را به‌صورت فعال و بقیه را غیرفعال در نظر گرفته شود (تخصیص عددی تصادفی در بازه ۰ تا ۱ به هر WM^k).

۲. برابر با تقاضای هر دوره در هر بازار به مقدار انتقال محصول از تولیدکننده به توزیع‌کننده، به مقدار تولید محصول در تولیدکننده، به مقدار انتقال قطعات از تأمین‌کننده به تولیدکننده، و به مقدار سفارش قطعات توسط تأمین‌کننده ــ در دوره‌ی متناسب قبل از آن ــ اضافه شود به‌گونه‌یی که تقاضاها در زمان خود برآورده شوند. فرضاً اگر تقاضای مشتریان بازار دوم در دوره دهم برابر ۱۰۰ واحد باشد و مقدار $TG^{۲}$ برابر ۳ باشد باید به میزان تولید در تولیدکننده در ۴ $(۳+۱)$ دوره قبل یعنی دوره ۶، تعداد ۱۰۰ واحد اضافه شود. همچنین با توجه به مقدار محصول فروش رفته و به تبع آن مقدار محصول بازگشتی، به مقدار نابودسازی محصول، حمل محصولات برگشتی به بازیافت‌کننده، مقدار بازیافت محصول، و انتقال قطعات از بازیافت‌کننده به تولیدکننده در دوره‌ی متناسب بعد از آن اضافه می‌شود. چون در نهایت باید جواب ایجاد شده توسط روش ارزیابی جواب بررسی و موجه شود، در این بخش هیچ ملاحظه و توجهی نسبت به محدودیت ظرفیت‌ها و یا اولویت بازیافت محصول نسبت به نابودسازی محصول صورت نمی‌گیرد.

۳. مقادیر متغیرهای مربوط به زنجیره باید به‌صورت نسبت (مانند آنچه در جدول ۳ نشان داده شده) درآیند.

۴. جهت ایجاد تنوع در جواب‌ها به‌منظور افزایش کارایی الگوریتم متاهیوریستیک به کار برده شده، باید مقادیر نسبت در عددی حقیقی که به‌صورت تصادفی از بازه $(۷-۱\mathrm{E}-۷, ۱+۱\mathrm{E}۱-۷)$ انتخاب می‌شود ضرب شوند.

۴.۴. تصحیح حدود تولید و بازیافت

چنانچه مقدار تولید محصول توسط تولیدکننده در یک دوره کم‌تر از بیشینه ظرفیت تولید باشد و در دوره‌ی بعد هم تولید انجام شود، هزینه‌ی راه‌اندازی مجدد تولید به دوره‌ی بعدی تعلق می‌گیرد. چون حد بالای متغیر نسبت تولید برابر ۱ در نظر گرفته شده (یا به‌عبارتی بیشترین میزان تولید برابر MP تعیین شده) در حین حل متاهیوریستیکی مدل ممکن است متغیر مقدار تولید به‌سختی به حد بالای خود برسد؛ یعنی در بسیاری موارد مقدار تولید در یک دوره اندکی کم‌تر از بیشترین ظرفیت تولید به دست آید؛ این امر باعث افزایش تعداد راه‌اندازی تولید و به تبع آن افزایش هزینه می‌شود. برای جلوگیری از این رخداد، طی مراحل الگوریتم مقدار بیشینه تولید که در جدول ۳ برابر ۱ تعیین شده است مقداری بزرگ‌تر از ۱ یعنی مثلاً ۱٫۳ قرار داده می‌شود ولی هنگام ارزیابی آن جواب اگر مقدارش بزرگ‌تر از ۱ بود برابر ۱ قرار داده می‌شود. همین روش تصحیح باید برای مقدار بازیافت محصول هم انجام شود.

۵.۴. روش‌های متاهیوریستیک

در این بخش چهار روش متاهیوریستیک الگوریتم ژنتیک (GA)[۳]، بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO)[۴]، تکامل تفاضلی (DE)[۵] و کولونی زنبورهای مصنوعی (ABC)[۶] که همگی مبتنی‌بر جمعیتی از جواب‌هایند استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها طبق ساختار اصلی خودشان ولی با لحاظ تغییرات بیان شده در بخش ایجاد جمعیت اولیه و تصحیح حدود تولید و بازیافت اجرا می‌شود.

۵. مثال عددی

برای مشاهده‌ی کارایی روش حل بیان شده تعدادی آزمایش طراحی و بررسی می‌شود. پارامترهای این آزمایشات نشأت گرفته از آزمایشاتی هستند که در تحقیقات[۱] طراحی و به کار برده شده است. در این آزمایشات تعداد دوره‌های زمانی برابر ۵، ۷، ۱۰ و ۲۰ و تعداد بازارها نیز برابر با ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ فرض شده است که از ترکیب آنها، ۱۶ نوع آزمایش ایجاد می‌شود. از هر نوع آزمایش نیز به تعداد ۱۰ مسئله‌ی مختلف ایجاد می‌شود که پارامترهای آنها نیز طبق جدول ۴ و توسط روابط ۱۸ تا ۴۶ ایجاد می‌شود. جدول ۴ برگرفته از تحقیقات پیشین[۱] است اما، به‌علت تفاوت موجود بین ماهیت مسئله‌ی نوشتار حاضر و مسئله‌ی بررسی شده در آن تحقیق[۱] (که موجب غیر اقتصادی شدن زنجیره می‌شود)، برخی از داده‌های آن (که با * مشخص شده) تغییر یافته است. در روابط مورد استفاده، به پارامترهایی که نسبت به مسئله‌ی بررسی شده[۱] جدیدند مقادیر جدیدی تخصیص داده شده است. همچنین از دو متغیر کمکی MPx^k و Δx^k نیز استفاده شده است. در این روابط عملگر $Random\{x\}$ عددی را به‌طور تصادفی از سطر x جدول ۴ انتخاب می‌کند. عملگر $U(a,b)$ عددی حقیقی را به‌طور تصادفی در بازه (a,b) تولید می‌کند. $Int(x)$ هم تابع جزء صحیح است.

$$\rho = Random\{۱۰\} \quad (۱۸)$$

$$RR, RP = U(۰٫۰۵, ۰٫۱۵) \quad (۱۹)$$

$$RH = Random\{۹\} \quad (۲۰)$$

$$ASA, ASB = ۰٫۵ \times Random\{۱۳\} \quad (۲۱)$$

$$AP, AD^k, AC^k = Random\{۱۳\} \quad (۲۲)$$

$$FA, FB = ۰٫۵ \times Random\{۳\} \quad (۲۳)$$

$$FE, FF = ۰٫۵ \times Random\{۱۲\} \quad (۲۴)$$

$$FQ, FD^k, FR^k = Random\{۱۲\} \quad (۲۵)$$

$$VA, VB, VE, VF = ۰٫۵ \times U(۰, ۱) \quad (۲۶)$$

$$VQ, VD^k, VC^k, VR^k = U(۰, ۱) \quad (۲۷)$$

$$SP = Random\{۴\} \quad (۲۸)$$

$$SR = U(۰, ۱) \times SP \quad (۲۹)$$

$$GP = Random\{۸\} \quad (۳۰)$$

جدول ۴. داده‌های لازم برای ایجاد پارامترهای مسائل نمونه.[۱]

ستون	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
سطر ۱	۲۴۰۰	۲۴۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۱۲۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۸۰۰	۱۸۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
سطر ۲	۳۶۰۰	۳۶۰۰	۲۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۴۵۰۰	۴۵۰۰
سطر ۳	۲۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۴۰	۱۰۰	۵۰	۲۰۰	۷۵	۲۰۰*	۲۰۰	۵۰*	۱۰۰*
سطر ۴	۳۰۰	۱۵۰	۵۰	۱۵	۱۵۰	۹۰	۲۷۵	۱۵۰	۱۲۰	۶۰	۸۰	۴۰
سطر ۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۸۰	۸۰	۷۵	۷۵	۱۲۰	۱۲۰
سطر ۶	۱	۱	۰٫۵	۰٫۵	۱	۱	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۶	۰٫۶
سطر ۷	۸	۸	۸	۸	۴۰	۴۰	۲۰	۲۰	۳۰	۳۰	۱۵	۱۵
سطر ۸	۴	۴	۴	۴	۷	۷	۶	۶	۶	۶	۴	۴
سطر ۹	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۰۵	۰٫۰۵
سطر ۱۰	۱	۱	۱	۱	۰٫۲۵	۰٫۲۵	۱	۱	۲	۲	۰٫۵	۰٫۵
سطر ۱۱	۴٫۱۶	۴٫۱۶	۴٫۱۶	۴٫۱۶	۲۰	۲۰	۱۰٫۴	۱۰٫۴	۱۵٫۶	۱۵٫۶	۰٫۰۷۸	۰٫۰۷۸
سطر ۱۲	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۵	۵۰	۲۵	۸۰	۴۰	۳۰	۱۵	۲۵۰	۵۰
سطر ۱۳	۳	۳	۵	۵	۶	۶	۸	۸	۴	۴	۳	۳

$$GR = U(۰, ۱) \times GP \quad (۳۱)$$

$$GS^k = U(۰, ۱) \quad (۳۲)$$

$$MA, MB, ME, MF, MQ, MG^k, MH^k = Random\{۵\} \quad (۳۳)$$

$$(MPx^k, \Delta x^k) = Random(۲, ۱) \quad (۳۴)$$

$$MP = \frac{\rho}{n} \times U(۰, ۱) \times \sum_k MPx^k \quad (۳۵)$$

$$\Delta^k = \frac{\rho}{n} \times \Delta x^k \quad (۳۶)$$

$$TS, TE, TQ, TG^k, TH^k = Int(۰٫۱۵ \times n \times U(۰, ۱)) \quad (۳۷)$$

$$\alpha_A, \alpha_B = ۰٫۵ \times Random\{۷\} \quad (۳۸)$$

$$\beta_A, \beta_B = U(۰٫۸, ۱٫۲) \times \frac{۵۲\rho}{۱۰۰n} \quad (۳۹)$$

$$\gamma_۱^k = U(۰٫۱, ۰٫۳) \quad (۴۰)$$

$$\gamma_۲^k = U(۰٫۷, ۰٫۹) \quad (۴۱)$$

$$\tau_۱^k = \frac{۱}{n} \times U(۰٫۳, ۰٫۵) \quad (۴۲)$$

$$\tau_۲^k = \frac{۱}{n(n-۱)} \times U(۰٫۳, ۰٫۵) \quad (۴۳)$$

$$BC^k = \frac{\rho}{n} \times U(۱, ۵) \quad (۴۴)$$

$$CA, CB, CE, CF, CI, CR, CQ = ۰٫۵ \times U(۰٫۹, ۱٫۱) \times \sum_k \Delta^k \quad (۴۵)$$

$$CD^k, CC^k = \Delta^k \times U(۰٫۹, ۱٫۱) \quad (۴۶)$$

مشخصات و پارامترهای مربوط به روش‌های متاهیوریستیکی به کار برده شده به روش سعی و خطا انتخاب شده که عبارت‌اند از:

- GA: تعداد جمعیت = ۱۵۰ - تقاطع = یکنواخت - ثابت تقاطع = ۰٫۷ - ثابت جهش = ۰٫۴ - کروموزوم: باینری (۸ بیت صحیح و ۱۵ بیت اعشاری)؛
- PSO: تعداد جمعیت = ۱۵۰ - پارامتر اجتماعی = ۱٫۵ - پارامتر شناختی = ۲٫۵ - ضریب اینرسی = ۱٫۲۵ - نسبت بیشترین سرعت به دامنه = ۰٫۱۰؛
- DE: تعداد جمعیت = ۱۵۰ - عامل جهش = ۱٫۵ - ثابت تقاطع = ۰٫۲۵؛
- ABC: تعداد زنبور کارگر = تعداد زنبور تماشاگر = ۷۵ - تعداد زنبور کاشف = ۱ - حداکثر دفعات ثابت ماندن جواب = تعداد زنبورهای کارگر ضرب در بعد مسئله.

الگوریتم‌های فوق به کمک نرم‌افزار Borland Delphi ۷ کدنویسی و سپس روی یک رایانه‌ی شخصی (۱٫۸ GHz Intel Dual Core, ۲ GB RAM) اجرا شده است. اجرای الگوریتم‌ها تا زمانی ادامه یافته که پس از $t_۱$ دقیقه تابع هدف کم‌تر از ۲۰ واحد رشد یابد، یا زمان اجرا بیش از $t_۲$ دقیقه طول بکشد. $t_۱$ و $t_۲$ برای مسائل با $n = ۵, ۷, ۱۰$ برابر ۱ و ۶، و برای مسائل با $n = ۲۰, ۴۰$ برابر ۲ و ۱۲ در نظر گرفته شده است. همچنین برای مسائل با ابعاد کوچک، جواب بهینه مسئله از طریق حل مدل MILP توسط نرم‌افزار GAMS به دست آمده است. چون مدل از نوع MILP است حل آن و به دست آوردن جواب بهینه وقتی ابعاد مسئله بزرگ باشند بسیار وقت‌گیر و غیرعملی است. به‌منظور به دست آوردن یک حد بالا برای کل مسائل ایجادشده، با حذف شرط باینری و عدد صحیح بودن از متغیرهای مدل، جواب برنامه‌ریزی خطی برای این مسائل به دست آورده شده است. سپس شاخص خطای جواب متاهیوریستیکی نسبت به جواب بهینه ($E۱$) توسط رابطه‌ی ۴۷، و نیز شاخص خطای جواب متاهیوریستیکی نسبت به حد بالا ($E۲$) توسط رابطه‌ی ۴۸ محاسبه شده است. در این روابط، X نتیجه‌ی حاصل از حل متاهیوریستیکی مدل،

جدول ۵. نتایج حاصل از حل متاهیوریستیکی مسئله‌های نمونه.

مسئله	n	m	بعد	GA		PSO		DE		ABC	
				ME۱	ME۲	ME۱	ME۲	ME۱	ME۲	ME۱	ME۲
۱	۵	۵	۱۱۵	۰٫۱۹۸۰	۰٫۵۷۴۱	۰٫۰۸۷۵	۰٫۵۱۷۳	۰٫۰۰۷۱	۰٫۴۸۷۰	۰٫۰۰۴۵	۰٫۴۸۶۸
۲	۵	۱۰	۱۹۵	۰٫۳۱۶۹	۰٫۶۲۹۶	۰٫۲۵۸۶	۰٫۶۰۷۱	۰٫۰۲۶۹	۰٫۵۰۴۵	۰٫۰۲۸۸	۰٫۵۰۵۳
۳	۵	۲۰	۳۵۵	۰٫۴۷۵۸	۰٫۶۴۲۵	۰٫۳۸۵۳	۰٫۵۷۷۶	۰٫۰۱۵۰	۰٫۴۰۲۷	۰٫۰۲۱۱	۰٫۴۰۵۹
۴	۵	۴۰	۶۷۵	۰٫۵۷۶۹	۰٫۶۹۰۳	۰٫۵۵۴۰	۰٫۶۶۶۷	۰٫۰۱۹۲	۰٫۳۸۸۱	۰٫۰۳۰۶	۰٫۳۹۳۹
۵	۷	۵	۱۵۹	۰٫۳۴۳۶	۰٫۶۷۶۲	۰٫۰۹۲۷	۰٫۵۸۲۲	۰٫۰۱۵۲	۰٫۵۴۹۱	۰٫۰۳۰۶	۰٫۵۵۳۱
۶	۷	۱۰	۲۶۹	۰٫۳۸۷۹	۰٫۵۷۲۰	۰٫۲۴۵۷	۰٫۵۰۰۰	۰٫۰۱۹۵	۰٫۴۰۳۷	۰٫۰۷۵۵	۰٫۴۱۲۲
۷	۷	۲۰	۴۸۹	-	۰٫۷۰۴۲	-	۰٫۶۴۰۲	-	۰٫۴۰۷۷	-	۰٫۴۱۶۹
۸	۷	۴۰	۹۲۹	-	۰٫۶۷۱۹	-	۰٫۵۹۸۹	-	۰٫۴۱۷۶	-	۰٫۴۴۱۰
۹	۱۰	۵	۲۲۵	-	۰٫۷۸۶۴	-	۰٫۷۲۷۲	-	۰٫۷۰۶۴	-	۰٫۷۰۷۶
۱۰	۱۰	۱۰	۳۸۰	-	۰٫۶۶۶۵	-	۰٫۵۲۲۴	-	۰٫۴۵۲۷	-	۰٫۴۶۱۲
۱۱	۱۰	۲۰	۶۹۰	-	۰٫۷۲۹۹	-	۰٫۶۲۴۳	-	۰٫۴۹۱۷	-	۰٫۵۰۱۴
۱۲	۱۰	۴۰	۱۳۱۰	-	۰٫۷۵۸۱	-	۰٫۶۸۹۳	-	۰٫۴۰۶۸	-	۰٫۴۴۲۱
۱۳	۲۰	۵	۴۴۵	-	۰٫۷۹۸۸	-	۰٫۷۰۹۷	-	۰٫۶۹۶۴	-	۰٫۷۰۲۷
۱۴	۲۰	۱۰	۷۵۰	-	۰٫۷۰۵۵	-	۰٫۶۱۳۹	-	۰٫۵۲۹۳	-	۵۳۸۱
۱۵	۲۰	۲۰	۱۳۶۰	-	۰٫۶۹۶۷	-	۰٫۶۰۹۱	-	۰٫۴۷۲۳	-	۰٫۴۹۴۳
۱۶	۲۰	۴۰	۲۵۸۰	-	۰٫۷۶۶۶	-	۰٫۶۴۸۴	-	۰٫۴۵۵۱	-	۰٫۵۱۵۰

A نتیجه‌ی حاصل از حل بهینه‌ی مدل MILP، و B حد بالای محاسبه شده است.

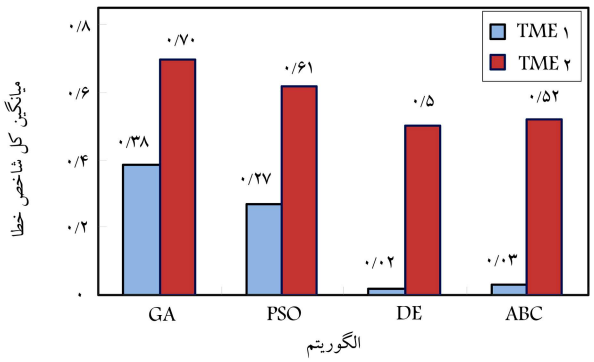
$$E۱ = \frac{A - X}{A} \quad (۴۷)$$

$$E۲ = \frac{B - X}{B} \quad (۴۸)$$

به‌طور مثال، اگر ششمین مسئله از اولین ترکیب ایجاد شده مورد نظر باشد، جواب بهینه‌ی آن (حاصل از حل مدل MILP) برابر ۳۳۹۳۴، جواب حل به‌کمک الگوریتم ژنتیک برابر ۲۶۷۴۳، و حد بالای محاسبه شده (حاصل از حل برنامه‌ریزی خطی) برابر ۶۹۵۹۳ به دست می‌آید. بنابراین مقدار شاخص خطای اول برابر ۰٫۲۱ و مقدار شاخص خطای دوم برابر ۰٫۶۲ خواهد شد. نتایج بررسی ۱۶۰ مسئله‌ی ایجاد شده (۱۰ مسئله برای هریک از ۱۶ نوع آزمایش) در جدول ۵ ذکر شده است. در این جدول مقدار میانگین شاخص‌های خطا $(ME۲, ME۱)$ حاصل از حل متاهیوریستیکی ۱۰ مسئله از هر نوع آزمایش، محاسبه و نمایش داده شده است.

همچنین در شکل ۵ میانگین کل شاخص‌های خطا $(TME۲, TME۱)$ حاصل از حل متاهیوریستیکی کل مسائل نمونه نشان داده شده است.

چنان که مشاهده می‌شود روش DE جواب بهتری ارائه کرده و با توجه به ابعاد بزرگ مسئله، میانگین شاخص اول خطای مناسبی (۲٪) ایجاد کرده است. در این روش شاخص دوم خطا درحدود ۰٫۵ نوسان می‌کند، البته این شاخص را نمی‌توان برای سنجش کارایی روش حل متاهیوریستیکی به کار برد ولی ظاهرا مشاهده می‌شود که مقدار این شاخص برای مسائل بزرگ (که قابلیت محاسبه‌ی



شکل ۵. میانگین کل شاخص‌های خطای حاصل از حل مسائل نمونه.

جواب بهینه و به‌تبع آن محاسبه‌ی شاخص خطای اول را ندارد) در همان حدود مسائل کوچک باقی مانده است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کارایی الگوریتم با بزرگ شدن مسئله (فرضاً مسئله‌ی ۱۶ دارای ۲۵۸۰ متغیر یا بعد است) کاهش نیافته است.

۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته با لحاظ هزینه‌های سفارش، نگه‌داری و کمبود، زمان و ظرفیت حمل و تولید و نیز ظرفیت انبارها برای برنامه‌ریزی عملیات سفارش، تولید و تحویل در یک افق زمانی محدود بررسی شده است. همچنین این

مطالعه به‌طور خاص برای کالاهای تکنولوژیک که قیمت‌شان پیوسته نزولی است انجام گرفته است. بدین‌منظور از چهار روش متاهیوریستیکی GA، PSO، DE و ABC برای حل مسئله استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش DE مقدار خطای مناسبی دارد و در بین چهار روش ذکر شده کم‌ترین خطا را دارد. از نتایج این تحقیق می‌توان برای دست‌یابی به جوابی تقریبی در تعیین بازارهای تحت پوشش و نیز مقدار و زمان انتقال قطعات و محصولات بین بخش‌های مختلف در زنجیره‌های حلقه‌بسته (به‌طور عام) و برای محصولات تکنولوژیک (به‌طور خاص) با تقسیم افق زمانی مورد مطالعه به تعداد زیاد (برنامه‌ریزی با دقت بالا) بهره جست. بررسی مدل‌های چندهدفه و نیز مدل‌هایی با تقاضای احتمالی برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

پانوشت‌ها

1. high-tech
2. mixed integer linear programming
3. genetic algorithm
4. particle swarm optimization
5. differential evolution
6. artificial bee colony

منابع (References)

1. Mungan, D. "An optimal operational policy for an integrated production-delivery system under continuous price decrease", Master Thesis, Louisiana State University, USA (2007).
2. Pishvaee, M.S., Rabbani, M. and Torabi, S.A. "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Applied Mathematical Modelling*, **35**(2), pp. 637-649 (2011).
3. Khajavi, L.T., Seyed-Hosseini, S.-M. and Makui, A. "An integrated forward/reverse logistics network optimization model for multi-stage capacitated supply chain", *iBusiness*, **3**(2), pp. 229-235 (2011).
4. Huang, Q. and Hu, B. "Simulation model of multi-echelon closed supply chain for spare parts", The 3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications, China (2011).
5. Wang, L. and Murata, T. "Study of optimal capacity planning for remanufacturing activities in closed-loop supply chain using system dynamics modeling", *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, China (2011).
6. Pishvaee, M.S. and Razmi, J. "Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming", *Applied Mathematical Modelling*, **36**(8), pp. 3433-3446 (2012).
7. Zeballos, L.J., Gomes, M.I., Barbosa-Povoa, A.P. and Novais, A.Q. "Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains", *Computers and Chemical Engineering*, **47**, pp. 237-247 (2012).
8. Mitra, S. "Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns", *Computers & Industrial Engineering*, **62**(4), pp. 870-879 (2012).
9. Kenné, J.-P, Dejax, P. and Gharbi, A. "Production planning of a hybrid manufacturing–remanufacturing system under uncertainty with in a closed-loop supply chain", *International Journal of Production Economics*, **135**(1), pp. 81-93 (2012).
10. Hassanzadeh Amin, S. and Zhang, G. "An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach", *Expert Systems with Applications*, **39**(8) , pp. 6782-6791 (2012).
11. Esteves, V.M., Sousa, J.M., Silva, C.A., Povoa, A. and Gomes, M. "SCant-design: Closed loop supply chain design using ant colony optimization", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Australia (2012).
12. Yang, P., Chung, S., Wee, H., Zahara, E. and Peng, C. "Collaboration for a closed-loop deteriorating inventory supply chain with multi-retailer and price-sensitive demand", *International Journal of Production Economics*, **143**(2), pp. 557-566 (2013).
13. Zeballos, L.J., Méndez, C.A., Barbosa-Povoa, A.P. and Novais, A.Q. "Multi-stage stochastic optimization of the design and planning of a closed-loop supply chain", *23rd European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, Finland (2013).
14. Georgiadis, P., Vlachos, D. and Tagaras, G. "The impact of product lifecycle on capacity planning of closed-loop supply chains with remanufacturing", *Production and Operations Management*, **15**(4), pp. 514-527 (2006).
15. Zeballos, L.J., Méndez, C.A., Barbosa-Povoa, A.P. and Novais, A.Q. "Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand", *Computers & Chemical Engineering*, **66**, pp. 151-164 (2014).

16. Yu, J., Sarker, B.R., Mungan, D. and Rahman, M. "A production-delivery inventory system under continuous price decrease and finite planning horizon", *Industrial Engineering Research Conference*, Canada (2008).

17. Bing-Chang, O. and Yi-Ming, F. "JIT delivery policy for a supply chain under continuous price decrease", *Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals*, China (2008).

18. Yu, J.C., Tsai, M., Liour, Y. and Cheng, N. "An efficient supplier-buyer partnership for hi-tech industry", *International Conference on New Trends in Information and Service Science*, China (2009).

19. Yu, J., Mungan, D. and Sarker, B.R. "An integrated multi-stage supply chain inventory model under an infinite planning horizon and continuous price decrease", *Computers & Industrial Engineering*, **61**(1), pp. 118-130 (2011).

20. Murayama, T., Yoda, M., Eguchi, T. and Oba, F. "Adaptive production planning by information sharing for reverse supply chain", Fourth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Japan (2005).

21. Georgiadis, P., Vlachos, D. and Tagaras, G. "The impact of product lifecycle on capacity planning of closed-loop supply chains with remanufacturing", *Production and Operations Management*, **15**(4), pp. 514-527 (2006).