

بهینه‌سازی یک زنجیره عرضه چهار سطحی از طریق هماهنگ‌سازی اجزای آن

محمد رضا اکبری جوکارⁱ؛ محسن شیخ سجادیهⁱⁱ

چکیده

مروری بر ادبیات مدل‌سازی زنجیره عرضه نشان می‌دهد که با وجود تحقیقات وسیع صورت گرفته در این زمینه، عمده مدل‌های ارائه شده تنها به مطالعه یک و یا حداکثر دو عامل از سه عامل تولید، توزیع و تأمین مواد محدود شده است. زنجیره عرضه مورد مطالعه در این مقاله، یک زنجیره عرضه چهار سطحی شامل تعداد دلخواهی خرده فروش، یک انبار مرکزی، یک کارخانه و تعداد دلخواهی تأمین کننده است به طوری که سه عامل مذکور توأمأً برای آن در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این مقاله تقاضای مشتریان به صورت تصادفی با تابع توزیع پواسون در نظر گرفته شده است. از آنجا که مدل‌سازی و بخصوص حل مدل یکپارچه‌ای که بتواند تمامی متغیرهای تصمیم این زنجیره را به طور همزمان بهینه کند، بسیار پیچیده خواهد بود؛ لذا در این مقاله سعی می‌کنیم تا به کمک یک مدل ترکیبی مشتمل بر چندین زیرمدل و با ایجاد هماهنگی بین آنها، جوابی نزدیک به بهینه برای کل زنجیره به دست آوریم.

کلمات کلیدی

مدل‌سازی زنجیره عرضه، مدل ترکیبی، روش تحلیلی، هماهنگ‌سازی اجزای زنجیره

Optimizing a Four Echelon Supply Chain by Coordinating its Parts

M.R. Akbari J.; M. Sheikh Sajadieh

ABSTRACT

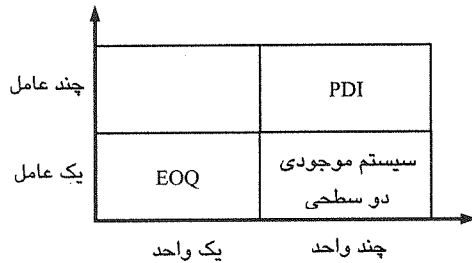
The majority of developed models in supply chain management are limited to planning at most two of three objectives that are production, distribution, and inventory. Since designing and specially solving a general model to optimize these three objectives all together is too complex, in this research we will try to find a near optimal solution using an integrated model made of three sub-models. Solving the integrated model needs each sub-model solved separately and by considering a sequence. Therefore an analytical approach including start point, the sequence of sub-models and termination criterion developed. Because deterministic condition restricts model's applicability, sub-models designed in stochastic condition with Poisson distribution that depends on arrival of customer. Finally, some numerical researches used to check the model validity.

KEYWORDS

Supply Chain Modeling, Integrated Model, Analytical Approach, Supply Chain Coordination

ⁱ دانشیار دانشکده صنایع دانشگاه صنعتی شریف؛ ۶۶۱۶۵۷۴۲ (۰۲۱): reza.akbari@sharif.edu

ⁱⁱ دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف: msajadieh@mehr.sharif.edu



شکل (۱): جایگاه PDI در ادبیات زنجیره تأمین

۲- مرور ادبیات

از آنجا که تحقیقات در زمینه هماهنگ‌سازی اجزای زنجیره تأمین از تنوع بالایی برخوردارند؛ لذا در اینجا خلاصه‌ای از اهم مشخصات برخی از این تحقیقات را در جدول (۱) نشان داده‌ایم. بر این اساس، تحقیق اخیر را می‌توان توسعه تنها مقاله چهارعاملی در حوزه PDI (کوهن و لی [۲]) دانست. در آن مقاله، تقاضا و زمان‌های تحویل، احتمالی با هر تابع توزیع دلخواه و تعداد کارخانجات، محصولات و مواد اولیه عددی اختیاری در نظر گرفته شده است. کوهن و لی در مقاله خود به مرور انواع زیرمدل‌ها و رابطه‌های ممکن بین آنها پرداخته‌اند؛ اما با توجه به فرضیات کلی تعریف شده در مسأله، تکنیک حلی برای مدل یکپارچه ارائه نشده است؛ همچنین اثرات تقریب‌های به کار رفته در زیرمدل‌ها در مدل نهایی تحلیل نشده است. در اینجا قصد داریم تا با ساده‌سازی برخی از فرضیات آن مقاله به مدل‌سازی هر یک از زیرمدل‌ها پرداخته و در نهایت الگوریتم حلی را برای یکپارچه کردن زیرمدل‌ها ارائه دهیم.

برای این منظور زنجیره تأمینی با یک کارخانه برای یک محصول در نظر گرفته شده و فرض گردیده است که مشتریان با تقاضای احتمالی با تابع توزیع پواسون به خرده‌فروشان مراجعه می‌کنند؛ همچنین بر خلاف سایر مقالات این حوزه، شرایط فروش از دست رفته برای خرده‌فروشان در نظر گرفته شده است که بر پیچیدگی مسأله می‌افزاید. سایر فرضیات مدل در بخش‌های بعدی تشریح خواهد شد.

در مدیریت سنتی، سه بخش زنجیره تأمین شامل تأمین مواد، تولید و توزیع مستقلاً مدیریت می‌شد و سازمان‌ها تلاش‌های خود را به درون واحدهای خود محدود ساخته بودند. گرچه این اقدام پیچیدگی‌های تصمیم‌گیری را کاهش داده بود؛ اما با افزایش فشار بازار رقابتی، شرکت‌ها دریافتند که چشم‌پوشی از روابط بین این اجزا، نتایج پرهزینه‌ای را در پی خواهد داشت و لذا مجبور شدند تا برای برآورده کردن خواسته‌های مشتریانشان به مباحث مدیریت زنجیره تأمین توجه کنند.

برای سال‌ها محققان بخش‌های تأمین، تولید و توزیع را مستقلاً بررسی می‌کردند؛ اما اخیراً توجه بیشتری به تحلیل زنجیره‌ها به صورت یک مجموعه یکپارچه و ترکیبی مطرح شده است.

در خصوص جایگاه مدل‌های ترکیبی می‌توان گفت که هدف در مدل‌های ساده‌ای همچون EOQ^۱، یافتن سیاست بهینه یک واحد مانند انبار بود به طوری که یک عامل همچون هزینه موجودی حداقل شود. طرح مباحث مدیریت زنجیره تأمین را می‌توان از این منظر، بررسی چند واحد به طور همزمان دانست به طوری که سعی می‌شود تا در آن، یک یا چند عامل برای تمامی واحدهای تحت بررسی بهینه شود. برای مثال، در عمده سیستم‌های موجودی دو سطحی، هدف بهینه‌سازی یک عامل برای مجموعه‌ای از واحدهاست.

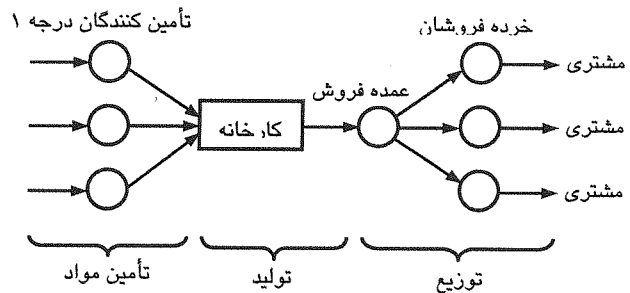
منطق زنجیره تأمین را با این مبنا که بهینگی مستقل تک‌تک واحدها لزوماً بهینگی کل را نتیجه نمی‌دهد، می‌توان برای عوامل مورد بررسی نیز تعمیم داد. بدین معنا که بهینگی مستقل بخش‌های مختلف همچون تولید، توزیع و... نمی‌تواند معادل بهینگی کل سیستم باشد و لذا لازم است تا تمام این عوامل یکجا بررسی شوند. در شکل (۱) موقعیت مدل ترکیبی تولید، توزیع، موجودی (PDI^۲) نسبت به سایر مدل‌ها نشان داده شده است. در مدل ترکیبی قصد بر بهینه‌سازی همزمان عوامل تولید، توزیع و تأمین در زنجیره عرضه است.

جدول (۱): مرور ادبیات مدل‌های ترکیبی

مقاله	نوع عامل‌ها	تکنیک حل	هدف (حداقل کردن)	موجودی	تقاضا
گلور و جونز [۳]	تأمین، تولید، توزیع	الگوریتم ابتکاری	هزینه‌های نگهداری موجودی	مرور دوره‌ای	احتمالی
ویلیامز [۸]	تولید، مونتاژ، توزیع	الگوریتم برنامه‌ریزی پویا	هزینه‌های نگهداری موجودی	مرور دوره‌ای	ثابت
ایشی [۶]	تولید، انبار، خرده‌فروشی	الگوریتم ابتکاری	محصولات بلا استفاده	مرور دوره‌ای	ثابت
کوهن و لی [۲]	تأمین، تولید، انبار، خرده‌فروشی	---	هزینه‌های نگهداری موجودی	مرور دائم	احتمالی
هاگ [۵]	تولید، انبار، خرده‌فروشی	الگوریتم شاخه و حد	هزینه تولید، حمل‌ونقل، موجودی	مرور دائم	ثابت
پتروویک [۷]	تأمین، تولید، توزیع	روش فازی و شبیه‌سازی	هزینه‌های نگهداری موجودی	مرور دائم	احتمالی

۳- ساختار و فرموله کردن مدل

در زنجیره ارائه شده در این مقاله تعدادی خردهفروش وجود دارند که به درخواست خرید مشتریان پاسخ می‌دهند. محصول مورد نیاز خردهفروشان از یک انبار مرکزی تأمین شده و انبار مرکزی محصول را مستقیماً از کارخانه دریافت می‌کند. به همین ترتیب، واحد تولیدی نیز مواد اولیه و قطعات مورد نیاز خود را از تأمین‌کنندگان بی‌واسطه تهیه می‌کند. شکل (۲) نمایی از زنجیره مورد نظر مشتمل بر سطوح خردهفروشان، انبار مرکزی، کارخانه و تأمین‌کنندگان را نشان می‌دهد.



شکل (۲): ساختار زنجیره تأمین

۳-۱- زیرمدل توزیع

زیر مدل توزیع یک سیستم موجودی دو سطحی مشتمل بر یک انبار و تعدادی خردهفروش است. خردهفروشان از سیستم موجودی پایه $(S-1, S)$ در حالت فروش از دست رفته پیروی می‌کنند. همچنین سیستم موجودی پایه در حالت پس‌افت برای انبار مرکزی در نظر گرفته شده است. هر مشتری با تقاضای پواسون به هر خردهفروش مراجعه می‌کند و در هر بار مراجعه تنها تقاضای یک محصول را دارد. انبار مرکزی نیز تقاضاهای رسیده را به ترتیب دریافت و پاسخ می‌دهد. هدف این زیرمدل یافتن سیاست بهینه سفارش‌دهی خردهفروشان و انبار مرکزی است به طوری که هزینه‌های نگهداری موجودی و کمبود حداقل شود. از آنجا که درباره این نوع سیستم‌های موجودی تحقیقات بسیاری صورت گرفته است؛ لذا در این مقاله از یکی از معروف‌ترین آنها؛ که اندرسن [۱] ارائه کرده است، کمک خواهیم گرفت و علاقه‌مندان را به مطالعه آن مقاله ارجاع می‌دهیم.

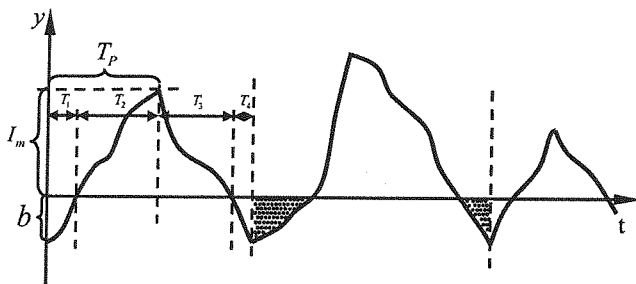
۳-۲- زیرمدل تولید

در این زیر مدل، کارخانه‌ای مد نظر است که قطعات را از تأمین‌کنندگان دریافت و به محصول تبدیل می‌کند. با توجه به اینکه تقاضای خردهفروشان به انبار مرکزی به توزیع پواسون تقریب زده شده است و از آنجا که در سیستم موجودی پایه در انبار مرکزی به ازای هر تقاضا یک سفارش صادر می‌شود؛ لذا

تقاضای رسیده به کارخانه نیز از توزیع پواسون پیروی می‌کند. کارخانه نرخ ثابت تولید دارد و از سیستم مرور دائم با کمبود پس‌افت برای سفارش‌دهی مواد پیروی می‌کند. زمان تحویل قطعات به کارخانه ثابت فرض می‌شود. اندازه تولید مضرب صحیحی از نرخ تولید در نظر گرفته شده و هر دو عدد صحیح می‌باشند و نقطه سفارش به عنوان پارامتر ثابت فرض شده است. هدف این زیر مدل یافتن اندازه دسته تولید بهینه است به طوری که هزینه‌های نگهداری، کمبود و راه‌اندازی حداقل شود. نمادهای مسأله بدین شکل تعریف شده است:

- h : هزینه نگهداری یک محصول در واحد زمان
- β : هزینه کمبود یک محصول در واحد زمان
- T_p : مدت زمان تولید در هر دوره
- λ : متوسط نرخ تقاضای ورودی به کارخانه
- P : نرخ تولید
- Q : حجم تولید در هر بار راه‌اندازی
- x_i : میزان تقاضا در واحد زمانی (روز) i ام
- y_i : سطح موجودی در انتهای روز i ام
- I_m : میزان موجودی در انتهای دوره تولید
- b : میزان کمبود در انتهای هر دوره
- A : هزینه هر بار سفارش‌دهی
- LT : زمان تحویل به کارخانه

سطح موجودی در این زیرمدل مطابق شکل (۳) است به طوری که هر دوره از چهار مقطع زمانی T_1, T_2, T_3, T_4 تشکیل شده است:



شکل (۳): نمودار سطح موجودی در کارخانه

هزینه نگهداری موجودی و کمبود در T_p :

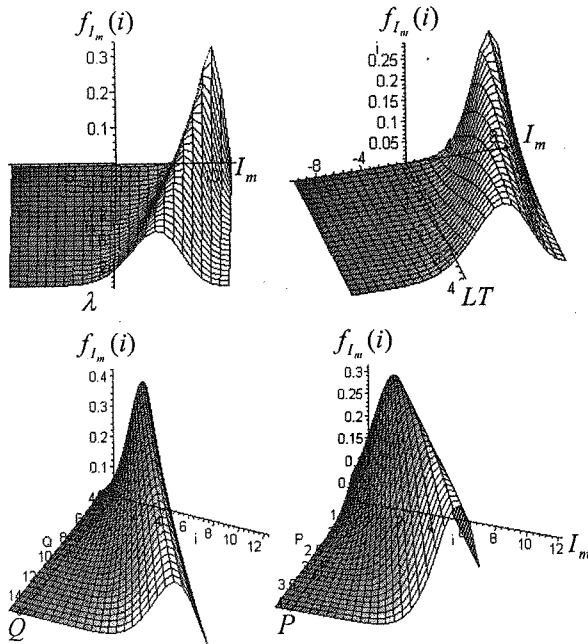
برای محاسبه هزینه‌ها در T_p به تابع توزیع سطح موجودی در انتهای روز i ام (y_i) نیاز است:

$$f_{Y_i}(y_i) = \frac{e^{-(LT+i)\lambda} [(LT+i)\lambda]^{iP-y_i}}{(iP-y_i)!} \quad (1)$$

به کمک این تابع توزیع، هزینه‌ها بدین شکل محاسبه می‌شود:

$$E(T_p \text{ در هزینه موجودی}) = h \times \sum_{i=0}^{T_p} \sum_{y=0}^{iP} y_i \cdot P(Y_i = y)$$

نرم افزارهای موجود اندازه بهینه تولید را محاسبه کرد.



شکل (۴): اثرات پارامترهای بخش تولید بر تابع I_m

۳-۳- زیرمدل تأمین مواد

هدف از این زیر مدل تعیین مقدار و نقطه سفارش هر قطعه است به طوری که هزینه‌های موجودی، کمبود و سفارش‌دهی برای تأمین‌کنندگان حداقل شود. سفارش قطعات از سوی کارخانه و برای هر دوره تولید به تأمین‌کنندگان اعلام می‌شود و لذا فاصله بین هر دو سفارش مقداری احتمالی و معادل طول دوره تولید می‌باشد. کمبود در این زیرمدل به صورت پس‌افت و زمان تحویل ثابت است. هر قطعه به وسیله یک تأمین‌کننده تهیه می‌شود و بین قطعات وابستگی وجود ندارد؛ لذا می‌توان زیر مدل تأمین مواد را به صورت m (تنوع قطعات) مسأله مستقل در نظر گرفت. تقاضای هر قطعه $m_i Q$ است که در آن m_i ضریب مصرف قطعه نام می‌باشد. تابع توزیع فاصله زمانی بین دو تقاضای متوالی (T) با توجه به رابطه $T = T_p + LT + T_3$ محاسبه می‌شود.

برای حل این زیرمدل از یکی از مدل‌های شناخته شده در این زمینه (گریوز و رینوی [۴]) کمک گرفته‌ایم. در آن مقاله، حجم و نقطه سفارش بهینه طی یک سیکل بسته ۴ قدمی به دست می‌آید که خوانندگان را به مطالعه آن مقاله ارجاع می‌دهیم. در مدل مذکور به تابع توزیع میزان تقاضا در فاصله زمانی تحویل نیاز داریم. گرچه تقاضای ورودی به تأمین‌کنندگان لزوماً از تابع توزیع پواسون پیروی نمی‌کند؛ اما با قبول درصد خطای ناشی از برقرار نبودن این فرض از فرایند پواسون برای تعیین تابع توزیع میزان تقاضا در فاصله زمانی تحویل استفاده

$$E(T_p \text{ در هزینه کمبود}) = \beta \times \sum_{i=0}^{T_p} \sum_{y=-\infty}^0 -y.P(Y_i = y)$$

هزینه‌های نگهداری موجودی و کمبود در T_4 :

هزینه موجودی برای این مقطع صفر است. با محاسبه تابع توزیع سطح موجودی، هزینه کمبود بدین شکل به دست می‌آید:

$$E(T_4 \text{ در هزینه کمبود}) = \lambda.\beta.\frac{LT(LT+1)}{2}$$

هزینه‌های نگهداری موجودی و کمبود در T_3 :

هزینه کمبود برای این مقطع صفر است. برای محاسبه هزینه نگهداری موجودی به تابع توزیع T_3 نیاز داریم که پس از انجام محاسبات بدین شکل به دست می‌آید:

$$P(T_3 = t) = \sum_{i=0}^Q \sum_{r=0}^i \sum_{s=i}^{\infty} \frac{e^{-(t+1)\lambda} . t^r . \lambda^s}{r!(s-r)!} \times \frac{e^{-\lambda(T_p+LT)} [\lambda(T_p+LT)]^{Q-i}}{(Q-i)!} \quad (2)$$

لذا هزینه کل موجودی در مقطع T_3 بدین شکل محاسبه می‌شود:

$$E(C_{T_3}) = \sum_{i=0}^Q \sum_{k=1}^{\infty} \left[i - \frac{h}{2}(k+1) \right] k.h.P(T_3 = k).P(I_m = i) \quad (3)$$

۳-۲- تقریب به کار رفته در زیر مدل تولید

برای سادگی در مدل‌سازی فرض شده؛ که در انتهای زمان تولید در هر دوره، سطح موجودی غیر منفی است. میزان خطای ناشی از این تقریب با احتمال موجودی زیر صفر در انتهای مقطع تولید ($P(I_m < 0)$) رابطه مستقیمی دارد. در ادامه تأثیر میانگین تقاضا، زمان تحویل به کارخانه، دسته تولید و نرخ تولید بر احتمال مذکور را مطالعه می‌کنیم. شکل (۴) نحوه تغییر تابع توزیع I_m به ازای تغییر عوامل فوق را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که میزان تقریب با نرخ تقاضا و زمان تحویل رابطه مستقیم و با حجم و نرخ تولید رابطه عکس دارد.

۳-۲-۲- حل مسأله

هزینه کل این زیر مدل (TC) عبارت است از:

$$TC = \frac{\lambda A}{Q} + \frac{1}{T} \left[\sum_{i=0}^Q \sum_{k=1}^{\infty} \left[i - \frac{h}{2}(k+1) \right] k.h.P(T_3 = k).P(I_m = i) + h \sum_{i=0}^{T_p} \sum_{y=0}^{i-p} y.P(Y_i = y) + \beta \left(\sum_{i=0}^{T_p} \sum_{y=-\infty}^0 -y.P(Y_i = y) + \lambda.\frac{LT(LT+1)}{2} \right) \right] \quad (4)$$

از آنجا که حجم تولید مضرب صحیحی از نرخ تولید است، لذا مسأله فوق یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح می‌باشد. برای محاسبه حجم بهینه تولید از تابع هزینه مشتق‌گیری می‌کنیم و آن را معادل صفر قرار می‌دهیم. از آنجا که در تابع هزینه، دوره تولید تنها مجهول است؛ لذا می‌توان به کمک

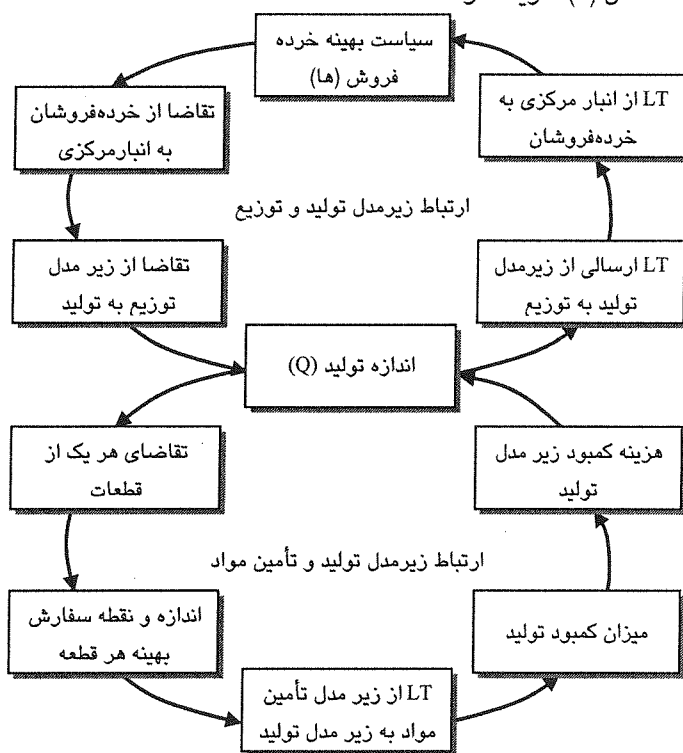
کرده‌ایم.

اگر v_i نشان‌دهنده ضریب مصرف قطعه نام براساس BOM³ محصول باشد، از آنجا که قطعات در اندازه‌های $v_i Q$ به تأمین کنندگان داده می‌شود؛ لذا حجم و نقطه سفارش به دست آمده را با در نظر گرفتن تابع هزینه به ضریبی از $v_i Q$ گرد می‌کنیم.

ع- مدل ترکیبی

ع-۱- روابط زیر مدل‌ها

به منظور دستیابی به مدلی یکپارچه لازم است تا ارتباط زیر مدل‌ها شناسایی شوند. بهینه‌سازی در مدل ترکیبی را می‌توان همانند بهینه‌سازی یک مدل جامع برای کل زنجیره دانست که تابع هدف آن به بخش‌های مختلف تقسیم شده است؛ اما برای ایجاد یکپارچگی و دستیابی به بهینه کل، به وسیله پارامترهای ارتباطی به یکدیگر وابسته شده‌اند. این پارامترها تأثیرات زیرمدل‌ها را به یکدیگر منتقل می‌کند به طوری که هر زیرمدل بهیچگی خود را در تعامل بین اجزای زنجیره به دست می‌آورد. با بررسی متغیرهای هر زیرمدل و تأثیرات آنها بر دیگر زیرمدل‌ها، می‌توان حلقه ارتباطات بین زیر مدل‌ها را مطابق شکل (۵) تعریف کرد.



شکل (۵): حلقه تعاملات بین زیرمدل‌ها

وجود این رابطه‌ها بعضاً به بررسی و اثبات نیاز دارند که در اینجا به تشریح آنها نخواهیم پرداخت.

ع-۲- الگوریتم حل

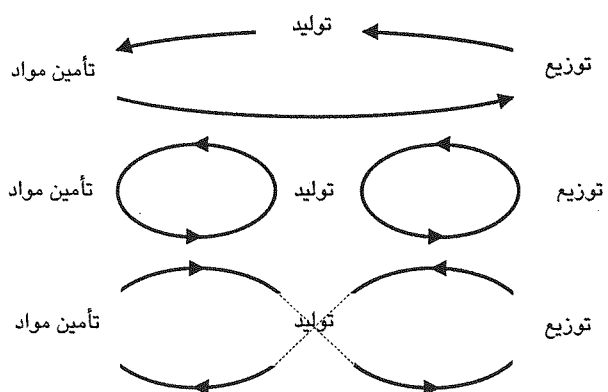
برای دستیابی به جواب نزدیک به بهینه برای کل زنجیره لازم است تا زیرمدل‌های ارائه شده در بخش‌های قبل به کمک روابط موجود بین آنها در مدلی ترکیبی به صورت یکپارچه در نظر گرفته شوند. برای این منظور می‌بایست الگوریتمی را تعریف کرد که نحوه تعامل بین سه زیرمدل را مشخص کند. تعریف صحیح الگوریتم این امکان را به وجود می‌آورد تا جواب نزدیک به بهینه مناسبی برای کل زنجیره چهارسطحی با کمترین تعداد تکرار به دست آید. برای بررسی الگوریتم و اعتبارسنجی مدل، ۱۰۰ مسأله نمونه طراحی شد به طوری که پارامترهای این مسائل به صورت تصادفی و به کمک توابع توزیع یکنواخت تولید شده‌اند. همچنین ساختار زنجیره‌های طراحی شده برای این مسائل به گونه‌ای است که بین ۱ تا ۵ خرده فروش و بین ۱ تا ۲۰ تأمین‌کننده برای آن در نظر گرفته شده است.

ع-۲-۱- نقطه شروع حل

با توجه به پارامترهای نامعلوم (زمان تحویل و نرخ تقاضای بین زیرمدل‌ها) در لحظه شروع به حل، زیرمدلی به عنوان نقطه شروع الگوریتم انتخاب می‌شود که کمترین تأثیرپذیری را از این پارامترهای نامعلوم داشته باشد. زنجیره مورد بررسی در این تحقیق از نوع کششی است؛ لذا فرضیات اولیه برای زیر مدل توزیع بیش از سایر زیرمدل‌ها مشخص است و به همین دلیل از این زیر مدل برای شروع به حل مدل ترکیبی استفاده می‌شود.

ع-۲-۲- توالی حل زیر مدل‌ها

در شکل (۶) ترتیب‌های مختلف حل زیرمدل‌ها ارائه شده است:



شکل (۶): توالی‌های ممکن برای حل زیرمدل‌ها

به منظور انتخاب بهترین توالی، بررسی‌های عددی بر روی ۱۰۰ مسأله نمونه انجام شد که خلاصه نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. ستون اول، میانگین تعداد تکرارها تا رسیدن به شرط توقف و ستون دوم میانگین درصد خطای حل در

مقایسه با نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین میانگین درصد انحراف جواب به دست آمده از الگوریتم بایهترین جواب به دست آمده از ۴۰ سناریوی تصادفی؛ که با شبیه‌سازی حل گردیده است، در ستون سوم خلاصه شده است. بر اساس این معیارها، توالی سوم به عنوان بهترین توالی انتخاب شد.

جدول (۲): تأثیر نوع توالی بر عملکرد الگوریتم

تعداد تکرار	خطا	انحراف
۵/۸	٪۲۲/۳	٪۱۰/۷
۷/۱	٪۷/۸	٪۸/۹
۳/۲	٪۴/۹	٪۱/۹

قدم ۳: تعیین نقطه سفارش‌دهی و سطح موجودی هریک از قطعات (حل زیر مدل تأمین مواد)
 قدم ۴: تعیین اندازه تولید بهینه در هر دوره با توجه به تغییرات ایجاد شده در قدم ۳

قدم ۵: $i = i + 1$ ، محاسبه هزینه کل زنجیره (Z_i)

قدم ۶: اگر تمامی متغیرهای بهینه بدون تغییر باقی ماندند:

توقف

$$S_i^* = S_i, S_0^* = S_0, Q^* = Q, Q_j^* = Q_j, r_j^* = r_j, Z^* = Z_i$$

در غیر این صورت: مراجعه به قدم ۱

۵- بررسی‌های عددی

هدف از این بررسی‌ها حصول اطمینان از کارکرد درست الگوریتم و حرکت صحیح بین زیرمدل‌هاست به طوری که مدل ترکیبی، جواب بهینه کل زنجیره عرضه چهار سطحی را ارائه دهد. برای این منظور ۱۰۰ مسأله مختلف طرح و قدم‌های الگوریتم برای هر کدام از آنها تا رسیدن به شرط توقف اجرا شده است. زیرمدل‌های توزیع و تأمین با توجه به ساختار الگوریتمی آنها، با نرم‌افزار Visual Basic 6.0 کد نویسی و حل شده‌اند. برای زیر مدل تولید نیز از نرم افزار Maple 9.0 استفاده شد. همچنین کدنویسی الگوریتم یکپارچه مدل ترکیبی برای مرتبط کردن زیرمدل‌ها نیز با نرم‌افزار Visual Basic 6.0 انجام گرفت. ذکر این نکته لازم است که کلیه بررسی‌های عددی بر روی یک کامپیوتر شخصی Pentium 4 با سرعت CPU 1.6 GHz و حافظه RAM 256 انجام شده است.

با توجه به عدم دسترسی به جواب‌های بهینه مسائل، امکان مقایسه نتایج الگوریتم با جواب‌های بهینه قطعی وجود ندارد و از این رو، از شبیه‌سازی مسائل از نرم افزار GPSS/H کمک گرفته‌ایم. در این راستا از شبیه‌سازی به دو منظور استفاده شد: نخست، تعیین میزان خطای الگوریتم در محاسبه هزینه کل و دوم تعیین میزان انحراف جواب پیشنهادی الگوریتم از جواب بهینه. برای مورد اول جواب‌های به دست آمده برای متغیرهای تصمیم از طریق الگوریتم، به عنوان سناریویی با شبیه‌سازی نیز حل شد تا مشخص شود الگوریتم در محاسبه هزینه کل چقدر خطا داشته است. در مورد دوم، برای هر یک از ۱۰۰ مسأله، ۴۰ سناریو به کمک تعریف سطوح مختلف برای متغیرهای تصمیم تولید و حل شد.

در هر دو مورد، هر سناریو ۱۰ بار تکرار شده و زمان شبیه‌سازی در هر تکرار معادل ۱۱۰،۰۰۰ واحد زمانی در نظر گرفته شد. تمامی نتایج نشان می‌داد که این مدت زمان برای رسیدن به شرایط پایدار کافی است. جدول (۳) نتایج مربوط به میانگین

۴-۲-۳ شرط توقف

هدف از الگوریتم ایجاد تعادل بین زیرمدل‌ها به منظور کاهش هزینه کل زنجیره است؛ لذا پس از هر تکرار، شرط توقف مبنی بر عدم تغییر جواب‌های بهینه $(Q_j^*, r_j^*, Q^*, S_0^*, S_i^*)$ بررسی می‌شود. در صورتی که تکرار الگوریتم تغییری در زیرمدل‌ها ایجاد نکند، می‌توان اطمینان حاصل کرد که ارتباطات زیرمدل‌ها به تعادل رسیده است. با توجه به شروع الگوریتم از یک منطقه غیرموجه، شرط توقف را می‌توان رسیدن به جواب موجه برای زنجیره دانست به طوری که زیرمدل‌ها در شرایط بهینه عمل کرده و پارامترهای بین آنها در حالت پایدار باقی می‌مانند.

۴-۲-۴ همگرایی الگوریتم

از آنجا که اثبات ریاضی همگرایی الگوریتم با توجه به وجود مسائل بهینه‌سازی مختلف در قدم‌های آن، کار پیچیده‌ای است؛ لذا در این تحقیق از روش‌های آماری برای این منظور کمک گرفته شده است. در این راستا ۱۰۰ مسأله نمونه به صورت تصادفی تولید شد و تحلیل‌های آماری بر روی آنها انجام شد به طوری که با قبول خطای موجود در بررسی‌های آماری، می‌توان نتایج آن را به کل جمعیت تعمیم داد. برای این منظور، آزمون فرض یک طرفه‌ای بر روی تعداد تکرارهای الگوریتم تا رسیدن به شرط توقف صورت گرفت و با توجه به نتایج به دست آمده، که در آن برای کلیه نمونه‌ها، تعداد تکرارها تا رسیدن به شرط توقف کمتر از ۵ بوده است، فرض محدود بودن تعداد تکرارها برای سطح اطمینان ۹۹٪ رد نشد.

۴-۲-۵ قدم‌های الگوریتم

قدم‌های الگوریتم بدین شکل خلاصه می‌شود:

قدم ۱: تعیین سطح بهینه نگهداری موجودی برای خرده‌فروشان و عمده‌فروش (حل زیرمدل توزیع)

قدم ۲: تعیین اندازه تولید بهینه در هر دوره

وانحراف معیار ۱۰ تکرار به دست آمده از شبیه‌سازی برای مورد اول و همچنین بهترین سناریوی مورد دوم را نشان می‌دهد. با بررسی بر روی ۱۰۰ مسأله نمونه و مقایسه هزینه‌های به دست آمده از الگوریتم با نتایج شبیه‌سازی مشخص شد که الگوریتم پیشنهادی به طور میانگین ۴/۹٪ در محاسبه هزینه کل خطا دارد. با توجه به خطاهای ۷ تا ۱۰ درصدی موجود در ادبیات برای زنجیره‌های سه سطحی از یک سو و فرض سیستم چهار سطحی برای تحقیق اخیر، خطای مذکور نتیجه‌ای امیدوار کننده است. این خطا بواسطه تقریب‌های به کار رفته در زیر مدل‌ها بوجود می‌آید. کمترین خطا در بین نمونه‌های بررسی

شده ۰/۳٪ و بیشترین آن ۱۱/۵٪ بوده است. همچنین میانگین تعداد تکرارهای الگوریتم تا رسیدن به شرط توقف ۳/۲ تکرار به دست آمد و هیچکدام از مسائل به بیش از ۴ تکرار برای رسیدن به شرایط پایدار نیاز نداشتند که این امر حکایت از سرعت همگرایی بالای الگوریتم دارد. زمان حل مسائل مورد بررسی بر اساس ابعاد مسأله و همچنین تعداد تکرارهای الگوریتم، متغیر بوده و از میانگین ۱۲/۷ برخوردار است.

جدول (۳): نتایج به دست آمده از الگوریتم و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی

مسأله	ساختار زنجیره		نتایج الگوریتم					نتایج شبیه‌سازی	
	تعداد خرده فروشان	تعداد تأمین کنندگان	هزینه کل	تعداد تکرارهای الگوریتم	زمان حل (ثانیه)	درصد خطا	انحراف از بهترین سناریو(%)	میانگین هزینه سناریوی پیشنهادی الگوریتم	انحراف معیار ۱۰ تکرار
۱	۱	۱	۱۵/۳۲	۲	۴/۴	۸/۲	۴/۵	۱۶/۷۳	۰/۰۲۰
۲	۱	۲	۱۷/۶۱	۲	۳/۸	۳/۲	۲/۶	۱۸/۲۰	۰/۰۵۱
۳	۱	۳	۱۸/۲۳	۳	۷/۴	۲/۰	۰/۰	۱۷/۸۸	۰/۰۰۱
۴	۱	۴	۲۲/۸۷	۳	۷/۲	۱/۵	۰/۰	۲۳/۲۱	۰/۰۴۳
۵	۱	۵	۲۸/۱۵	۴	۸/۷	۴/۵	۰/۰	۲۶/۹۴	۰/۰۷۱
۶	۱	۶	۳۵/۷۰	۳	۹/۵	۰/۱۶	۰/۰	۳۵/۹۱	۰/۰۶۱
۷	۲	۱	۲۴/۹۱	۳	۷/۸	۵/۶	۰/۰	۲۶/۴۰	۰/۰۳۳
۸	۲	۲	۳۰/۱۸	۴	۱۴/۶	۱۱/۵	۵/۵	۳۴/۱۱	۰/۰۲۹
۹	۲	۳	۲۷/۳۵	۳	۱۱/۴	۷/۶	۴/۴	۲۹/۶۰	۰/۰۱۶
۱۰	۲	۴	۲۹/۴۴	۲	۷/۴	۲/۶	۰/۰	۲۸/۷۰	۰/۰۱۶
۱۱	۲	۵	۳۳/۱۲	۳	۱۱/۶	۵/۰	۳/۷	۳۱/۵۴	۰/۰۵۴
۱۲	۲	۶	۳۵/۹۰	۴	۱۵/۱	۷/۴	۴/۵	۳۸/۷۷	۰/۰۷۸
۱۳	۳	۱	۳۰/۲۱	۳	۴/۴	۱۰/۸	۶/۶	۳۳/۸۹	۰/۰۶۴
۱۴	۳	۲	۵۷/۳۵	۳	۱۰/۰	۴/۱	۰/۰	۵۵/۰۸	۰/۰۰۶
۱۵	۳	۳	۴۸/۹۱	۳	۹/۳	۷/۰	۰/۰	۵۲/۶۰	۰/۱۳۴
۱۶	۳	۴	۶۰/۲۳	۲	۸/۵	۱/۱	۰/۰	۶۰/۸۸	۰/۱۱۷
۱۷	۳	۵	۵۶/۱۱	۳	۱۰/۸	۲/۸	۰/۰	۵۷/۷۲	۰/۰۹۷
۱۸	۳	۶	۶۲/۱۰	۴	۱۵/۷	۳/۳	۱/۷	۶۰/۱۳	۰/۱۰۱
۱۹	۴	۱	۵۹/۲۸	۳	۱۲/۵	۵/۱	۰/۰	۶۲/۴۶	۰/۱۱۹
۲۰	۴	۲	۵۸/۲۲	۲	۱۱/۷	۲/۱	۰/۰	۵۹/۴۶	۰/۱۴۱
۲۱	۴	۳	۶۷/۸۲	۴	۱۵/۵	۵/۸	۰/۰	۷۲/۰۳	۰/۱۴۰
۲۲	۴	۴	۶۸/۱۴	۳	۱۵/۱	۷/۲	۲/۱	۷۳/۳۹	۰/۱۵۹
۲۳	۴	۵	۷۰/۰۱	۲	۱۰/۴	۱/۷	۰/۰	۷۱/۱۲	۰/۱۳۶
۲۴	۴	۶	۶۵/۵۵	۳	۷/۲	۲/۱	۰/۰	۶۳/۵۷	۰/۱۲۷
۲۵	۵	۱	۵۴/۳۶	۳	۸/۵	۸/۵	۲/۸	۵۹/۴۰	۰/۱۶۰
۲۶	۵	۲	۶۶/۳۰	۳	۱۰/۲	۷/۹	۲/۱	۷۲/۰۰	۰/۱۸۳
۲۷	۵	۳	۵۹/۱۳	۴	۱۶/۱	۵/۳	۳/۶	۶۲/۴۴	۰/۱۴۲
۲۸	۵	۴	۷۰/۱۱	۳	۱۳/۱	۵/۲	۳/۴	۷۳/۹۶	۰/۲۰۷
۲۹	۵	۵	۶۶/۶۲	۲	۸/۳	۲/۲	۰/۰	۶۵/۱۹	۰/۱۸۹
۳۰	۵	۶	۶۱/۴۷	۳	۱۰/۸	۰/۹	۰/۰	۶۲/۰۷	۰/۰۹۵

		⋮				⋮			
---	۰/۳۱۷	---	٪۱/۹۲	٪۴/۹	۱۲/۷	۳/۲	---		میانگین

هزینه‌ها با نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده اختلاف کمتر از ۵٪ است.

در این تحقیق، ارتباطی بین خرده‌فروشان و یا بین تأمین کنندگان در نظر گرفته نشده است و لذا امکان تعمیم مسأله برای زنجیره‌هایی با فرض وجود روابط داخل هر سطح وجود دارد. همچنین می‌توان مدل ارائه شده را درحالت چند محصولی بررسی کرد. یکی دیگر از موارد قابل بررسی، بهینه‌سازی زنجیره‌های تأمین با فرض وجود تعاملات بیشتر بین زیرمدل‌هاست. برای مثال، در این تحقیق، تأثیر بخش توزیع بر تولید به تغییرات تقاضای محصول محدود شده، حال آنکه ممکن است کارخانه با تغییر تقاضای محصول، نرخ تولید خود را نیز تغییر دهد.

۷- مراجع

- [۱] Andersson, J.; P. Melchioris; "A two-echelon inventory model with lost sales", International Journal of Production Economics, 69, 307-315, 2001.
- [۲] Cohen, M.A.; Lee, H.L., "Strategic analysis of integrated production-distribution systems: Models and methods", Operations Research, 36/2, 216-228, 1988
- [۳] Glover, F.; Jones, G.; Karney, D.; Klingman, D.; Motem J. "An Integrated production, distribution, and inventory planning system", Interfaces, 9/5, 21-35, 1979
- [۴] Graves, S.C., Rinnooy Kan, A.H.G., Zipkin, P.H., "Logistics of Production and Inventory", 2nd, North-Holland: Elsevier Science Publishers B.V., 1993.
- [۵] Haq, A.N.; Vrat, P.; Muramatsu, R., "An integrated production, inventory and distribution systems", International journal of production research, 26/3, 39-49, 1991
- [۶] Ishii, K.; Takahashi, K.; Muramatsu, R.; "Integrated production, inventory and distribution systems", International Journal of Production Research, 26/3, 473-482, 1988
- [۷] Petrovic, D. "Simulation of supply chain behavior and performance in an uncertain environment", International Journal of Production Economics, 71, 429-438, 2001
- [۸] Williams, J.F., "A hybrid algorithm for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures", Management Science, 29/1, 77-92, 1983

از آنجا که الگوریتم مورد بررسی یک جواب نزدیک بهینه را تولید می‌کند، لذا به منظور بررسی انحراف این جواب با جواب بهینه و با توجه به عدم دسترسی به جواب‌های بهینه مطلق، به کمک تکنیک‌های طراحی آزمایش‌ها مقایسه‌ای بین میانگین هزینه سناریوی پیشنهادی از الگوریتم با میانگین بهترین جواب مربوط به ۴۰ سناریوی طراحی شده صورت گرفت و مشخص شد که جواب‌های الگوریتم از بهترین جواب، انحرافی ۱/۹۲ درصدی دارند. در تحلیل‌های صورت گرفته، به شرط توزیع نرمال برای مقادیر مورد بررسی (هزینه‌ها) نیاز داریم که با استفاده از میانگین ۱۰ هزینه به جای تحلیل بر روی یکبار محاسبه هزینه، تا حدود زیادی شرط مذکور برآورده می‌شود. علاوه بر این در ۵۳٪ موارد الگوریتم به بهترین جواب از بین سناریوهای مورد بررسی رسیده است.

همچنین برای تحلیل میزان تأثیرپذیری مدل از نقطه شروع الگوریتم (پارامترهای اولیه)، حل تمامی مسائل از ۱۰ نقطه مختلف آغاز و مشخص شد که در تمامی این موارد، جواب یکسانی برای مسأله بدست آمده و نقاط شروع تنها بر تعداد تکرارهای الگوریتم مؤثر بوده است؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که با احتمال بالا الگوریتم نسبت به نقاط شروع غیر حساس است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد تا با تعریف سه زیر مدل در شرایط تقاضای احتمالی برای یک زنجیره تأمین چهار سطحی و تعیین تعاملات بین آنها، الگوریتم حلی برای ایجاد مدلی ترکیبی ارائه شود. برای این منظور مدل‌سازی و روش حل مستقل هر یک از زیر مدل‌ها صورت گرفت و نحوه تعامل بین اجزا و پارامترهای رابط بین آنها تعریف و سپس الگوریتم حلی به منظور ترکیب ساختن آنها ارائه شد به طوری که تکرار قدم‌های آن ما را به هماهنگی بیشتر بین اجزای زنجیره و دستیابی به جواب بهینه کل برای آن هدایت می‌کند.

بررسی‌های عددی صورت گرفته حکایت از عملکرد بسیار مطلوب مدل دارد به طوری که جواب‌های به دست آمده از الگوریتم، انحرافی ۱/۹۲ درصدی از بهترین جواب دارند و در بیش از نیمی از موارد، الگوریتم به بهترین جواب از بین سناریوهای مورد بررسی رسیده است. همچنین علی‌رغم تقریب‌های به کار رفته در محاسبه توابع هزینه، مقایسه این

-
- ¹ Economic Order Quantity
 - ² Production, Distribution, Inventory
 - ³ Bill of materials