

ارائه یک روش ابتکاری برای حل مسئله زنجیره تامین دوسطحی دوهدفه

محدثه ربیعه^{۱*}، بیژن خیام باشی^۲، حسین رضائی دولت‌آبادی^۳ و سید مجتبی سجادی^۴

۱. دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور

۲. دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳. دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان

۴. دانشکده کارآفرینی، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۶/۳۱ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۱/۱۶)

چکیده - در دنیای رقابتی عصر حاضر، مشتریان خواهان عکس‌العمل سریع‌تر، قابلیت اطمینان بالاتر و انعطاف‌پذیری بیشتر در تغییر نیازهایشان هستند. این فاکتورها، تولیدکنندگان و ارائه‌کنندگان خدمات را ملزم به پیدا کردن راه‌های بهتری برای مدیریت جریان مواد در سازمان‌هایشان، جهت پیشرفت و حفظ بقای خود می‌کنند. در این مقاله به بررسی مسئله چند محصولی چند دوره‌ای در یک زنجیره تامین دو-سطحی؛ شامل چند تولیدکننده و توزیع‌کننده پرداخته شده است. با اهداف پیشینه‌سازی سودکل زنجیره و کیفیت محصولات، مدلی جدید برای مسئله ارائه شده است. با توجه به اینکه روش‌های بهینه‌سازی سنتی، به آسانی امکان در نظر گرفتن بیش از یک هدف در بهینه‌سازی را نمی‌دهند و در عوض روش‌های ابتکاری ابزار کاربرد بهینه‌سازی چند هدفه را به آسانی و با کارایی بالا فراهم می‌نمایند و سبب کوتاه‌تر شدن زمان رسیدن به جواب بهینه و یا نزدیک به بهینه می‌شوند، از اینرو بهینه‌یاب جدیدی مبتنی بر الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل مدل پیشنهادی ارائه شده است. در بهینه‌یاب طراحی شده، از مفاهیم اساسی بهینه‌سازی چند هدفه، جهت هدایت عوامل جستجوگر در فضای جستجو به سمت منطقه بهینه استفاده شده است. کارایی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از مسائل نمونه تصادفی متعددی با نرم‌افزار LINGO مقایسه شده است. نتایج محاسباتی بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی است.

واژگان کلیدی: زنجیره‌تأمین، بهینه‌سازی چندهدفه، مدل‌سازی ریاضی، الگوریتم تکامل تفاضلی.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mohadesehrabieh@yahoo.com

Proposing a Heuristic Method for Solving Two-Stage Supply Chain with Two Objective Functions

M. Rabieh¹, B. Khayyam Bashi², H. Rezaie Dolatabadi³ and S. M. Sajjadi⁴

1. Industrial Engineering, Payam Nour University, Iran.

2. Industrial Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology.

3. Administrative Sciences & Economy, Isfahan University.

4. Entrepreneurship, Tehran University.

Abstract: *In today's competitive world, customers want a faster response, higher reliability and greater flexibility in changing needs. These factors require manufacturers and service providers to find better ways to manage the flow of their organization, the progress and to maintain their survival. This paper investigated the problem of multi-product multi-period in a two-level supply chain, including producers and distributors. Presented problem with the purpose of maximum profit of the whole chain and production quality has been modeled. As regards traditional optimization's methods don't provide possibility of considering more than one purpose easily in optimization, Instead, heuristic methods of usage tools of multi-objective optimization provides easily with high quality also increase the speed of reaching to the optimization goal or near it. So a new multi-objective optimization tool is presented based on differential evolution algorithm and optimal Pareto concepts for solving problems. The efficiency of this algorithm is demonstrated by comparing it's numerical experiment results with those of MODE algorithm and LINGO package. Computational results indicate that the proposed algorithm has better performance.*

Keywords: *Supply chain, multi-objective optimization, mathematical modeling, differential evolution algorithm.*

۱- مقدمه

در گذشته، تنوع و تعداد کالاها و خدمات محدودتر بوده و فاصله بین تولیدکنندگان و مصرف کنندگان مسافت کمتری داشت در نتیجه توزیع کالاها، مسئله قابل توجهی به حساب نمی آمد و خرده فروشان به راحتی می توانستند کالاهای مورد نیاز خود را تهیه کنند، ولی امروزه تولید انبوه، افزایش تنوع کالاها، افزایش تعداد مصرف کنندگان و فاصله میان آنها با تولیدکنندگان و توزیع کنندگان، باعث افزایش اهمیت توجه به سیستم تولید و توزیع مناسب شده است. از طرفی با افزایش رقابت بیشتر بین شرکتها در بازار، تلاش آنها برای کسب موقعیت ثابت تر و پایدارتر به نحوی است که می توان هدف از این رقابت را متمایز شدن و پیشی گرفتن از دیگر رقبا دانست و این رقابت شدید در عصر حاضر مدیران شرکتها و سازمانها را بر آن داشته است که برای رسیدن به این هدف، خود را به علم و تکنولوژی روز مجهز نمایند. ازاینرو افزایش کارایی و کاهش هزینهها دو عامل مهم برای به دست آوردن سهم بیشتر در این رقابت است. صاحبان بسیاری از صنایع دریافته اند که برای ادامه حضور در

بازار تنها بهبود فرایندهای داخلی و انعطاف پذیری در توانایی های شرکت کافی نیست و توزیع کنندگان محصولات نیز باید ارتباط نزدیکی با سیاست های توسعه بازار تولیدکننده داشته باشند. با چنین نگرش هایی رویکردهای زنجیره تأمین^۱ و مدیریت آن پا به عرصه وجود نهاد. تعاریف مشابهی برای مدیریت زنجیره تأمین^۲ ارائه شده که یکی از بهترین های آن توسط هند فیلد^۳ مطرح شده است: "شبکه ای است که تمام فعالیت های مرتبط با جریان و تبدیل کالاها از مرحله ماده خام تا کالاهای نهایی و نیز جریان اطلاعاتی مرتبط با آنها را شامل می شود. مواد و اطلاعات هر دو در بالا و پایین شبکه جریان دارند" [۱].

با توجه به تعاریف ذکر شده کارشناسان این عقیده را دارند که چه در بخش تولید و چه در بخش خدمات، شناسایی مشکلات زنجیره تامین و گام نهادن در راستای حل این مشکلات یک امر ضروری است. ارتباط بهینه بین تولید و توزیع می تواند در کل زنجیره تأثیر زیادی داشته باشد. یکی از راهکارهایی که برای ارتباط بهینه تر و دقیق تر در زنجیره تأمین در نظر می گیرند مدل

جستجوی تصادفی شده است. از جمله این روش‌ها الگوریتم‌های فرا ابتکاری هستند که سریع‌تر و بهتر از روش‌های سنتی به جواب می‌رسند. در این گونه روش‌ها که معمولاً به علت پیچیدگی مسائل، ناتوانی و یا زمان‌بر بودن روش‌های دقیق در حل مسئله به آنها رجوع می‌کنیم، به‌طور کلی با یک الگوریتم جستجوی محلی، که با یک روش ابتکاری قادر است خود را از دام بهینه موضعی رها کند مواجه می‌شویم. در مقالات بسیاری، با تمرکز بر شبکه تولید و توزیع، با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، روش‌های حل تقریبی برای مسئله زنجیره تأمین ارائه شده است. نعیمی و همکاران یک زنجیره تأمین چند محصولی با یک تولیدکننده و یک خرده‌فروش را بررسی کرده‌اند که تقاضا برای هر محصول به وسیله قیمت و مخارج تبلیغ مشخص می‌شود؛ یک استراتژی سخت با دو سناریو را پیشنهاد می‌دهند در اولی بر یک رویکرد سنتی که در آن تولیدکننده راهنما است متمرکز شدند و در دومی اجازه دادند تا خرده‌فروش به‌عنوان یک عضو مسلط بر زنجیره عمل کند. چندین مثال را با الگوریتم رقابتی حل نموده‌اند تا کارایی مدل پیشنهادی را نشان بدهند [۹].

جولای و همکاران^{۱۰} یک مدل فازی تولید-توزیع ارائه کرده‌اند و آن را با الگوریتم متاهوریستیک حل کرده‌اند. مدل شامل یک تولیدکننده و چند نوع محصول و مرکز توزیع و خرده‌فروش است. مدل را با سه الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات و الگوریتم ژنتیک ترکیبی توسعه یافته حل کرده‌اند و نتایج را با هم مقایسه کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که الگوریتم ژنتیک ترکیبی توسعه یافته بهتر از بقیه است [۱۰]. بیلگن^{۱۱} یک مسئله تولید و توزیع در زنجیره تأمین، شامل تخصیص محصولات در بین خطوط تولید متفاوت در کارخانجات تولید و تحویل محصولات به مراکز توزیع را ارائه می‌کند. او مدلی فازی برای بهینه‌سازی مسئله با هدف هماهنگی تصمیمات، پیشنهاد می‌کند و آن را با یک الگوریتم حل نموده است [۱۱]. پارک و همکاران^{۱۲} یک مدل برای طراحی یک زنجیره تأمین سه سطحی از تأمین‌کنندگان و مراکز توزیع و

کردن این عوامل توسط مدل‌های ریاضی و حل مدل توسط روش‌های بهینه‌یابی است تا بتوانند با توجه به تابع هدفی که تعیین می‌کنند کل زنجیره تأمین را بهینه سازند. مقالات مختلفی با تمرکز بر شبکه تولید و توزیع، به بررسی مدل‌سازی مسئله زنجیره تأمین پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. گبنیمی و همکاران^۴ یک مدل یکپارچه تولید-توزیع برای مسئله پویای تخصیص-مکان با بهینه‌سازی سطح موجودی ارائه کرده‌اند [۲]. داس و سنگوپتا^۵، یک مدل تولید-توزیع برای شبیه‌سازی استراتژیک ارائه کرده‌اند. این مدل، یک مدل چنددوره‌ای است و با در نظر گرفتن تقاضای غیر قطعی و زمان حمل و نقل حل شده - است [۳]. گروس مان و یو^۶ یک مدل غیرخطی مختلط چنددوره‌ای را برای مسئله تولید و توزیع زنجیره تأمین به وسیله توجه به انتخاب تأمین‌کننده و مکان کارخانجات، پیشنهاد داده‌اند [۴]. ریزک و همکاران^۷ یک مدل ریاضی برای حل مسئله تولید و توزیع با چندین مرحله را ارائه کرده‌اند، مدل آنها شامل چندین مرحله تولید است و به هزینه حمل و نقل بین مکان تولید و مراکز توزیع اهمیت داده می‌شود [۵]. لی و کیم^۸ نیز با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع مختلف، ساختار سیستم تولید و توزیع چند کارخانه‌ای، چند محصولی و چند دوره‌ای را ارائه نمودند [۶]. جایارما و پیرکول^۹ یک مدل یکپارچه تولید-توزیع از نوع احتمالی ارائه دادند که تابع هدف مدل هزینه‌های ناشی از تولید و توزیع را حداقل می‌نماید و محدودیت‌ها نیز مربوط به تقاضا و ظرفیت مراکز است [۷]. پویا به ارائه مدل ریاضی برنامه‌ریزی تولید و توزیع به صورت قطعی و فازی پرداخته است. این مدل به دنبال حداقل کردن هزینه‌های تولید، نگهداری و کمبود محصولات در انبارهای توزیع، هزینه‌های تولید و نگهداری قطعات، هزینه‌های خرید و نگهداری مواد خام و سایر هزینه‌های حمل و نقل می‌باشد. محدودیت‌های این مدل شامل محدودیت‌های بالانس موجودی، ظرفیت ماشین آلات، منابع در دسترس، ظرفیت نگهداری و ظرفیت توزیع است [۸].

تغییرات عمده در زمینه بهینه‌سازی در طی سال‌های اخیر منجر به معرفی تعدادی از روش‌های غیرکلاسیک و مبتنی بر

خرده‌فروشان ارائه کرده‌اند و تعیین تعداد تأمین‌کنندگان و مراکز توزیع و مینیمم کردن هزینه‌های موجودی و حمل و نقل هدف مسئله می‌باشد و نشان می‌دهند که رویکرد هیوریستیک پیشنهاد شده برای حل این مدل مؤثر است [۱۲]. لی و همکاران^{۱۳} یک مدل تخصیص ظرفیت برای یک زنجیره تأمین سه سطحی از تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان و مراکز توزیع ارائه کرده‌اند و هدف این مدل، بهینه‌سازی تخصیص ظرفیت است. مدل را با یک تخفیف لاگرانژ و الگوریتم هیوریستیک و هیوریستیک تجزیه براساس تخفیف لاگرانژ حل کرده‌اند. نتایج را با هم مقایسه کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که الگوریتم هیوریستیک بهتر عمل می‌کند [۱۳]. لیکنز و وندال^{۱۴} یک مدل خطی صحیح مختلط ارائه کرده‌اند و هدف آن مینیمم کردن هزینه‌های فرایندها و حمل و نقل است نشان می‌دهند که مدل می‌تواند توسعه پیدا کند و با یک مدل صفی ترکیب شود. مدل ارائه شده را با الگوریتم ژنتیک براساس تکنیک‌های تکامل تفاضلی حل کرده‌اند [۱۴]. امیری یک شبکه توزیع در زنجیره تأمین را طراحی کرده است. برای حل مدل LP طراحی شده از تکنیک ساده‌سازی لاگرانژی به دلیل کاهش زمان مورد نیاز در مسائل بزرگ استفاده می‌شود و با استفاده از این تکنیک، یک راه حل شدنی به‌عنوان کران پایین برای راه حل بهینه در طول الگوریتم به دست می‌آید [۱۵]. در جداول ۱ و ۲ مقایسه‌ای بین تحقیقات مختلف از نظر فرضیات، روش حل و ساختار زنجیره تأمین و نوع مدل و تابع هدف‌های مورد استفاده انجام شده است.

این مقاله به بررسی مسئله زنجیره تأمین شامل دو سطح تولید و توزیع در حالت چند دوره‌ای چند محصولی می‌پردازد. به منظور انجام تحلیل‌ها و رسیدن به سیاست‌های مناسب مدیریت تولید و توزیع محصولات که هدف این تحقیق است، می‌باید از تکنیک‌ها و ابزار مناسبی برای حل مسئله زنجیره تأمین مورد نظر و سپس تحلیل آن استفاده نمود. از اینرو، یک مدل خطی صحیح مختلط^{۱۵} (MILP) برای تولید محصول در چندین کارخانه و ارسال آن به چندین مرکز توزیع با اهداف بیشینه‌سازی سود زنجیره و کیفیت محصولات طراحی شده است.

حل بسیاری از مسائل، مستلزم بهینه‌سازی همزمان چندین هدف است که اغلب نمی‌توان در آنها، یک راه حل را به عنوان بهترین راه حل مسئله معرفی کرد. بهترین روش برای حل مسائل چند هدفه، پیشنهاد دادن مجموعه‌ای از راه حل‌های مغلوب نشده است که هر یک از آنها اهداف را در سطح قابل قبولی، برآورده می‌سازند که اصطلاحاً مجموعه بهینه پارتو^{۱۶} نامیده می‌شوند. امروزه بیشتر مسائل پیچیده نیازمند ارزیابی تعداد انبوهی از حالت‌های ممکن برای تعیین یک جواب دقیق هستند. زمان لازم برای یافتن یک جواب دقیق اغلب بیشتر از یک طول عمر است. هیوریستیک‌ها با استفاده از روش‌های توسعه، ارزیابی‌های کمتر و ارائه جواب‌هایی در محدودیت‌های زمانی قابل قبول دارای نقشی اثربخش در حل چنین مسائل خواهند بود. پس دیگر روش‌های کلاسیک در زمان محاسباتی معقول قادر به حل بسیاری از مسائل نیستند. در همین راستا، الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری و الگوریتم‌های تکاملی به عنوان جایگزینی برای روش‌های کلاسیک به کار برده می‌شوند در واقع الگوریتم‌های هیوریستیکی برای یافتن توازی بین یافتن حل بهینه و زمان حل، به وجود آمده‌اند و هدف اصلی آنها یافتن حل بهینه یا تقریباً بهینه در زمان قابل قبول است. از اینرو، برای حل مدل پیشنهادی، با توجه به - داشتن متغیرهای پیوسته، الگوریتم تکامل تفاضلی توسعه داده شده است. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از برخی مسائل نمونه حل شده، توسط الگوریتم پیشنهادی و نرم‌افزار لینگو به بحث و نتیجه‌گیری در این راستا پرداخته شده است.

ساختار ارائه مطالب در ادامه به این صورت خواهد بود. در بخش دوم، مدل ریاضی مسئله ارائه خواهد شد، در بخش سوم ساختار الگوریتم پیشنهادی تشریح خواهد گردید، بخش چهارم به بیان نتایج محاسباتی اختصاص یافته است و سرانجام در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مدل ریاضی

در این بخش، مدل ارائه شده برای مسئله زنجیره تأمین دو سطحی معرفی می‌شود. زنجیره تأمین شامل چندین کارخانه و

جدول ۱- مرور روش‌های حل پیشنهاد شده در منابع

نویسنده	فرضیات	روش حل	سطوح زنجیره
داس و سنگوپتا [۳]	چند دوره‌ای، چند نوع مشتری، تولیدکننده داخلی و خارجی، تقاضا غیر-قطعی، زمان غیرقطعی	لینگو	تولید- توزیع
بیلگن [۱۱]	چند تولیدکننده، چند توزیع‌کننده، تعادل موجودی در مراکز توزیع اهمیت دارد، وسایل مجاز به تخلیه بار در دو مرکز توزیع هستند، در نظر گرفتن چند خط تولید در هر کارخانه و میزان تولید هر خط متفاوت است	شبیه‌سازی	تولید- توزیع
گبنیمی و همکاران [۲]	چند تولیدکننده و توزیع‌کننده، بین کل ظرفیت انباشته ممکن برای تولیدات در هر دوره با کل تقاضا ارتباط وجود دارد، محصولات تولید شده در نقاط مختلف شبکه توزیع انبار می‌شوند	الگوریتم تکراری	تولید- توزیع
جولای و همکاران [۱۰]	چند دوره‌ای، یک تولیدکننده، چند محصولی، چند توزیع‌کننده و خرده‌فروش و مشتری، تاریخ تحویل به وسیله توزیع‌کننده مشخص می‌شود، تقاضا از نوع پس‌افت	الگوریتم ژنتیک، الگوریتم دسته‌زرات، الگوریتم ژنتیک توسعه یافته	تولید-توزیع - خرده‌فروش - مشتری
پارک و همکاران [۱۲]	چند تأمین‌کننده و تولیدکننده و خرده‌فروش، در نظر گرفتن ریسک موجودی و زمان تأخیر، هر مرکز توزیع از یک تأمین‌کننده و هر خرده‌فروش فقط از یک مرکز توزیع تغذیه می‌شوند، ظرفیت مراکز توزیع محدود است.	الگوریتم هیوریستیک دوفازی با تکنیک تخفیف لاگرانژ	تأمین - توزیع - خرده‌فروش
لی و همکاران [۱۳]	چند تأمین‌کننده و تولیدکننده، چند توزیع‌کننده، انبار در مراکز توزیع ولی برای کارخانجات در نظر گرفته نشده است و آنها فقط موادخام را نگه می‌دارند، زمان تأخیر ناچیز	تخفیف لاگرانژ، الگوریتم ابتکاری، الگوریتم ابتکاری با تکنیک تخفیف لاگرانژ	تأمین - تولید - توزیع
نعیمی و همکاران [۹]	چند محصولی، چند تولیدکننده و خرده‌فروش، مخارج تبلیغ بر میزان تقاضا برای هر محصول موثر است، تقاضا غیرخطی	الگوریتم رقابتی	تولید - خرده‌فروش
رضائی و داودی [۱۶]	چند دوره‌ای، چند تأمین‌کننده و تولیدکننده، مسائل چندین سایز، در نظر داشتن مجاز بودن و نبودن کمبود موجودی	الگوریتم ژنتیک توسعه یافته	تأمین - تولید

مراکز توزیع^{۱۷} (DCs) می‌باشد. ساختار زنجیره مربوطه در شکل

۱ آورده شده است.

- تمام محصولات در هر دوره زمانی به مراکز توزیع حمل می‌شوند.
- تقاضا قطعی و از نوع پس‌افت است یعنی تقاضای برآورده نشده که مشتری برای جبران این کمبود منتظر می‌ماند.

۱-۲ فرضیات

- چند دوره‌ای
- چند محصولی

۲-۲ نمادها

نمادهای مورد استفاده در این مقاله به شرح زیر می‌باشد
 i : علامت نوع محصول ($i=1, \dots, I$)

- دو سطح شامل چند تولیدکننده و چند توزیع‌کننده
- مراکز توزیع بر حسب ظرفیت و هزینه نگهداری با هم تفاوت

جدول ۲- تابع هدفهای مفروض در مرور منابع

نویسنده							
داس و سنگو پتا [۳]	بیلگن [۱۱]	گبنیمی و همکاران [۲]	جولای و همکاران [۱۰]	پارک و همکاران [۱۲]	لی و همکاران [۱۳]	نعیمی و همکاران [۹]	رضائی و داودی [۱۶]
هزینه	*	*	*	*	*	*	*
سود	*		*		*	*	*
سطح کیفیت							*
نوع مدل	MIP	FMILP	MILAP	MOLP	NIP	MIP	BNP
							MOMINLP

ch_{ikt} : هزینه نگهداری محصول i در مرکز توزیع k در پایان دوره t

co_{ikt} : هزینه عملکرد مرکز توزیع k برای محصول i در دوره t
 P_{it} : قیمت محصول i در دوره t

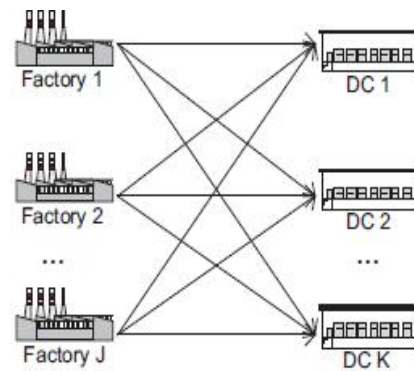
M_{ikt} : ظرفیت نگهداری محصول i در مرکز توزیع k در دوره t
 N_{jkt} : ظرفیت حمل محصول از کارخانه j به مرکز توزیع k در دوره t

D_{ikt} : تقاضا برای محصول i از طرف مرکز توزیع k در دوره t
 PT_{ij} : زمان فرایند تولید هر واحد محصول i در کارخانه j
 ST_{ijk} : زمان مورد نیاز برای حمل محصول i از کارخانه j به مرکز توزیع k

DT_{ikt} : زمان تحویل محصول i از مرکز توزیع k در دوره t
 f_{ijt} : سطح کیفیت محصول i در کارخانه j در دوره t (منظور میزان پیروی از نیاز مشتری، در تولید کردن محصول است)
 μ_{ij} : نسبت رشد سطح کیفیت محصول i در کارخانه j

۲-۴ متغیرهای تصمیم

X_{ijt} : مقدار محصول i که در کارخانه j در دوره t تولید می‌شود.
 Y_{ijkt} : مقدار محصول i که به مرکز توزیع k از کارخانه j در دوره t تحویل داده می‌شود.
 I_{ikt} : میزان موجودی محصول i در مرکز توزیع k در پایان دوره t
 Z_{ij} : برابر است اگر محصول i در کارخانه j تولید شود و در غیر



شکل ۱- ساختار زنجیره تامین

j : علامت کارخانه ($j=1, \dots, J$)

t : علامت دوره زمانی ($t=1, \dots, T$)

k : علامت مرکز توزیع ($k=1, \dots, K$)

۲-۳ پارامترها

cp_{ijjt} : هزینه تولید محصول i در کارخانه j در دوره t
 Ct_{ijkt} : هزینه حمل محصول i از کارخانه j به مرکز توزیع k در دوره t

SC_{it} : هزینه کمبود محصول i در دوره t
 cv_{ij} : هزینه ثابت محصول i در کارخانه j (منظور هزینه‌هایی است که به میزان تولید محصول بستگی ندارند مانند هزینه‌های سفارش دهی)

این صورت برابر صفر است.

U_{ikt} : مقدار محصول i که توسط مرکز توزیع k در دوره t توزیع می‌شود.

R_{ikt} : میزان تقاضای محصول i که از مرکز توزیع k در دوره t برآورده نمی‌شود.

۵-۲ مدل ریاضی

مدل ریاضی مسئله، با استفاده از معادله‌های (۱) الی (۱۲) ارائه شده است:

$$\begin{aligned} \text{MAX } Z_1 = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I p_{it} \sum_{k=1}^K U_{ikt} - \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{tijk} Y_{ijkt} + \right. \\ & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{vij} Z_{ij} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{pijt} X_{ijt} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K c_{hikt} I_{ikt} + \\ & \left. \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K c_{oikt} U_{ikt} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I c_{sit} \sum_{k=1}^K R_{ikt} \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\text{MAX } Z_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{ij0} e^{t \mu_{ij}} X_{ijt} \quad (2)$$

$$\text{s.t.: } I_{ikt} \leq M_{ikt} \quad \forall i, k, t \quad (3)$$

$$P_{t ij} X_{ijt} + S_{t ijk} Y_{ijkt} \leq D_{t ikt} \quad \forall i, j, k, t \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I Y_{ijkt} \leq N_{jkt} \quad \forall j, k, t \quad (5)$$

$$I_{ikt} = I_{ikt-1} + \sum_{j=1}^J Y_{ijkt} - U_{ikt} \quad \forall i, k, t \quad (6)$$

$$R_{ikt} = R_{ikt-1} + D_{ikt} - U_{ikt} \quad \forall i, k, t \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K Y_{ijkt} = X_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J Y_{ijkt} = U_{ikt} \quad \forall i, k, t \quad (9)$$

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } X_{ijt} > 0 \\ 0 & \text{if } X_{ijt} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$X_{ijt} \leq M Z_{ij} \quad \forall i, j, t \quad (11)$$

$$X_{ijt}, Y_{ijkt}, U_{ikt}, R_{ikt}, I_{ikt} \geq 0 \quad \forall i, j, k, t \quad (12)$$

تابع هدف در معادله (۱)، سود زنجیره را نشان می‌دهد و از

کم کردن هزینه‌هایی از جمله هزینه حمل محصول به مرکز توزیع، هزینه کارخانه جهت تولید محصول، هزینه تولید محصول در کارخانه، هزینه نگهداری محصول توسط مرکز توزیع، هزینه مرکز توزیع جهت ارسال محصول و هزینه کمبود محصول از درآمد حاصل می‌شود. معادله (۲) بیانگر سطح کیفیت محصول می‌باشد. کیفیت محصول وابسته به زمان و کارخانه‌ای است که محصول در آن تولید می‌شود. f_{ij0} سطح کیفیت در اولین دوره اجرایی را نشان می‌دهد. محدودیت ظرفیت سطح موجودی در هر دوره زمانی با استفاده از معادله (۳) ارائه شده است. معادله (۴) محدودیت زمان تحویل را تضمین می‌کند. محدودیت ظرفیت حمل به مراکز توزیع در دوره‌های زمانی با استفاده از معادله (۵) بیان شده است. معادله (۶) توازن موجودی در مراکز توزیع را نشان می‌دهد. باید مقدار محصولی که به مرکز توزیع وارد می‌شود با مقدار محصولی که از مرکز توزیع خارج می‌شود برابر باشد. توازن سطح پس‌افت محصول در هر دوره زمانی با استفاده از معادله (۷) نشان داده شده است. معادله (۸) ضمانت می‌کند که هیچ موجودی در کارخانجات باقی نمی‌ماند و تمام محصولات در هر دوره زمانی به مراکز توزیع حمل می‌شوند. معادله (۹) بیان می‌کند که باید مقدار محصولی که از مرکز توزیع ارسال می‌شود با مقدار محصولی که از کل کارخانجات به مرکز توزیع حمل می‌شود، برابر باشد. معادله (۱۰) بیانگر این است که اگر محصول i در کارخانه j تولید شود متغیر مربوطه یک و در غیر این صورت صفر می‌باشد. از آنجائی که حالت‌های مربوط به متغیر Z_{ij} ، بعد از تولید شدن متغیر X_{ijt} ، بررسی می‌شود اگر مقدار متغیر X_{ijt} در کل دوره زمانی مثبت باشد (یعنی محصول i در کارخانه j تولید شده است) آنگاه متغیر Z_{ij} مربوطه یک است و در غیر این صورت مقدار متغیر Z_{ij} صفر می‌باشد، معادله (۱۱) ارتباط میان متغیر Z_{ij} را با میزان تولید در هر دوره نشان می‌دهد و M ، یک عدد بسیار بزرگ است. متغیرها نشان‌دهنده میزان محصولی که تولید و توزیع

می‌گردد، هستند لذا مقادیر کوچک‌تر از صفر برای آنها بی‌معنی خواهد بود. این موضوع با معادله (۱۲) تضمین می‌شود.

۳- الگوریتم تکامل تفاضلی پیشنهادی

الگوریتم فرا ابتکاری تکامل تفاضلی^{۱۸} (DE) یک روش محاسباتی تکاملی مبتنی بر جمعیت جواب‌ها است. مانند سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری، الگوریتم مذکور ابزار بهینه‌سازی است که می‌تواند برای حل انواع مختلفی از مسایل بهینه‌سازی تک هدفه روی فضای پیوسته به کار گرفته شود. این الگوریتم نسخه توسعه یافته‌ای از الگوریتم ژنتیک (گلدبرگ^{۱۹}، ۱۹۸۹) برای بهینه‌سازی سریع‌تر است [۱۷]. نخستین بار مفهوم الگوریتم تکامل تفاضلی روی فضاها - پیوسته^{۲۰} توسط استرن و پرایس^{۲۱} در سال ۱۹۹۵ مطرح گردیده است. روشی آسان و قوی است که به تعداد کمی متغیرهای کنترلی نیاز دارد و با بررسی‌های زیاد ثابت شده که همگرایی سریع‌تری نسبت به دیگر روش‌ها دارد [۱۸]. مسائلی که بهینه‌سازی سراسری روی فضای پیوسته را شامل می‌شوند ویژگی‌های مشخصی از یک سیستم را توسط انتخاب سیستم پارامتر، بهینه می‌سازند؛ که برای راحتی، جواب‌های یک سیستم معمولاً به صورت یک بردار ارائه می‌شوند.

الگوریتم DE یک روش تکاملی است که از N بردار جواب D بعدی^{۲۲}، $X_{i,T}$ ، به‌عنوان یک جمعیت برای هر نسل^{۲۳} (تکرار) استفاده می‌کند. منظور از یک تکرار، این است که عمل موردنظر برای تمام N عضو جمعیت انجام شود. $X_{i,T}$ برداری از متغیرهای تصمیم می‌باشد که نشان‌دهنده عضو انتخابی i ام در جمعیت در تکرار T ام است. N در طول فرایند مسئله تغییر نمی‌کند و یک عدد صحیح می‌باشد. ساختار کلی الگوریتم تکامل تفاضلی در شکل ۲ ارائه شده است.

ابتدا جمعیتی از بردارها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند که

باید تمام فضای جواب را بپوشاند. یک توزیع یکنواخت را برای انتخاب تصادفی فرض می‌کنیم. هر بردار از جمعیت، یک بار به‌عنوان بردار هدف مطرح می‌شود بنابراین N امکان رقابتی در یک نسل وجود دارد. سپس سه اندیس به‌صورت تصادفی از میان جمعیت جواب‌ها انتخاب می‌شوند تا با استفاده از اپراتور جهش و ترکیب جواب جدید ساخته شود و در نهایت با ارزیابی جواب‌ها، معلوم می‌شود که کدام جواب به نسل بعد منتقل می‌شود.

مراحل الگوریتم تکامل تفاضلی به‌صورت زیر شرح داده می‌شود:

۱. یک جمعیت از جواب‌ها به‌صورت تصادفی تولید می‌شوند.

۲. انتخاب سه اندیس از میان جمعیت به‌طور تصادفی

۳. اپراتور جهش به‌صورت زیر اعمال می‌شود:

برای هر بردار هدف $X_{i,T}$ ، یک بردار تغییرپذیر، $V_{i,T+1}$ بر طبق رابطه (۱۴) تولید می‌شود. $V_{i,T+1}$ نشان‌دهنده جواب جدیدی است که در تکرار $T+1$ ام متناظر با عضو i ام جمعیت، توسط عملگر جهش تولید شده است.

رابطه (۱۳) بیان می‌کند که از 1 تا N تغییر می‌کند یعنی در این روش N تا جواب (بردار) اولیه داریم. i نشان‌دهنده شماره جواب‌ها است، یعنی از بین N جوابی که داریم هر بار چندمین جواب، در لیست مورد نظر می‌باشد:

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

$$V_{i,T+1} = X_{r_1,T} + F(X_{r_2,T} - X_{r_3,T}) \quad (14)$$

$$r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (15)$$

$$r_1, r_2, r_3 \text{ اندیس‌های تصادفی و صحیح می‌باشند و } F > 0 \text{ است؛} \\ F \in [0, 1] \quad (16)$$

F یک ضریب ثابت و حقیقی است تا افزایش اختلاف $(X_{r_2,T} - X_{r_3,T})$ را کنترل کند. در واقع جواب‌های جدید را با اضافه کردن اختلاف بین دو بردار از جمعیت به بردار سوم تولید می‌کند. شکل ۳ یک مثال از تابع دو بعدی را برای تولید $v_{i,T+1}$ توسط اپراتور جهش نشان می‌دهد.

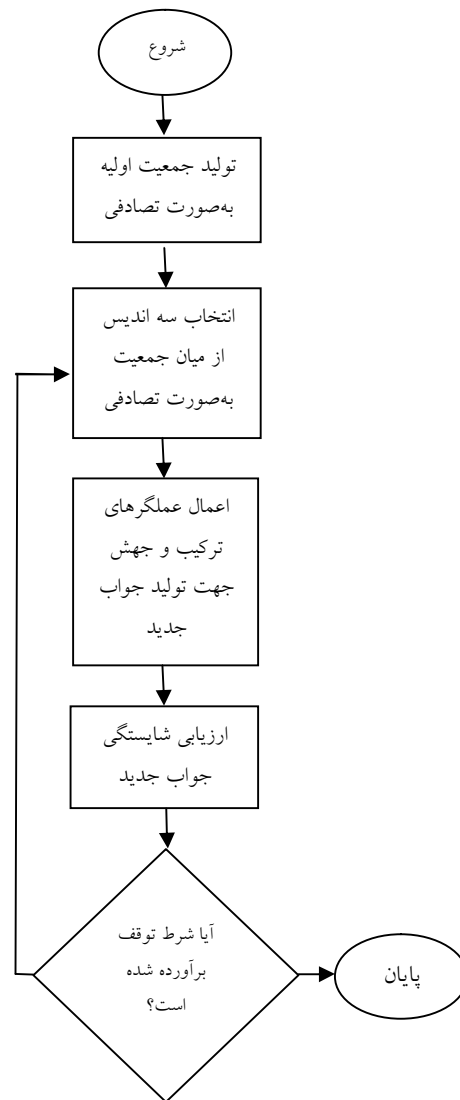
۴. اپراتور ترکیب به‌صورت زیر اعمال می‌شود:

شاخصه j_{rand} یک عدد صحیح تصادفی است که در بازه $[1, D]$ انتخاب می‌شود و $rand_j(0,1)$ یک توزیع یکنواخت در بازه $(0,1)$ می‌باشد. $CR \in (0,1)$ یک پارامتر کنترلی است که توسط استفاده کننده تعیین می‌شود. در ترکیب، یک بردار از مقدارهای صفر و یک به صورت تصادفی ایجاد می‌شود و با توجه به نظر تصمیم گیرنده $u_{i,T+1}$ مقادیر خود را از $V_{i,T+1}$ و یا $X_{i,T}$ می‌گیرد. مثلاً تصمیم گیرنده تعیین می‌کند که اگر در بردار تصادفی ایجاد شده، مقدار یک باشد بردار $u_{i,T+1}$ مقدار مربوطه را از $V_{i,T+1}$ بگیرد و اگر صفر باشد مقدار مربوطه خود را از $X_{i,T}$ بگیرد. یعنی بین بردار جوابی که داشته‌ایم و بردار جواب جدیدی که از اپراتور جهش به دست آورده‌ایم ترکیب صورت می‌دهیم. شکل ۴ یک مثال برای مکانسیم ترکیب برای بردار V بعدی نشان می‌دهد.

۵. انتخاب جواب (ارزیابی شایستگی جواب)

برای اینکه تصمیم بگیریم که بردار $u_{i,T+1}$ عضوی از نسل بعد باشد یا خیر، ارزش بردار $u_{i,T+1}$ و $X_{i,T}$ را با هم مقایسه می‌کنیم. اگر تابع هدف به ازای بردار $u_{i,T+1}$ ارزشی بهتر از $X_{i,T}$ به دست آورد، بردار $u_{i,T+1}$ جایگزین بردار $X_{i,T}$ در نسل بعد می‌شود و در غیر این صورت بردار $X_{i,T}$ به نسل بعد می‌رود. مسئله زنجیره تامین دو سطحی تحت مفروضات مورد بررسی در این مقاله، یک مسئله دو هدفه همراه با محدودیت می‌باشد. در حالی که الگوریتم DE برای مسائل تک هدفه و بدون محدودیت است. در نتیجه در این مقاله، الگوریتم تکامل تفاضلی چند هدفه (MODE)^{۲۵} برای حل مسئله مورد نظر ارائه شده است. همان‌طور که می‌دانیم یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه می‌تواند در قالب بهینه‌سازی یک مجموعه از توابع هدف، معمولاً در تعارض با یکدیگر، از طریق تعیین یک بردار از متغیرهای تصمیم‌گیری تعریف شود. فرموله‌بندی چنین مسئله‌ای به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize / Maximize } f_i(x) \quad i = 1, \dots, M \\ & \text{Subject to: } \begin{cases} g_j(x) = 0 & j = 1, \dots, N \\ h_k(x) \leq 0 & k = 1, \dots, K \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$



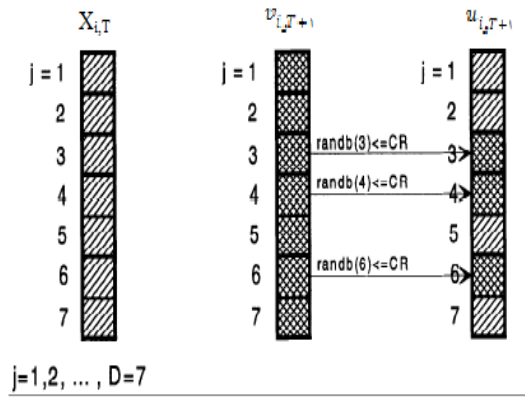
شکل ۲- ساختار الگوریتم تکامل تفاضلی

برای افزایش تنوع^{۲۴} در جواب‌ها، ترکیب به صورت زیر شرح داده می‌شود. $u_{i,T+1}$ نشان‌دهنده جواب جدیدی است که در تکرار $T+1$ ام متناظر با عضو i ام جمعیت، توسط عملگر ترکیب تولید شده است:

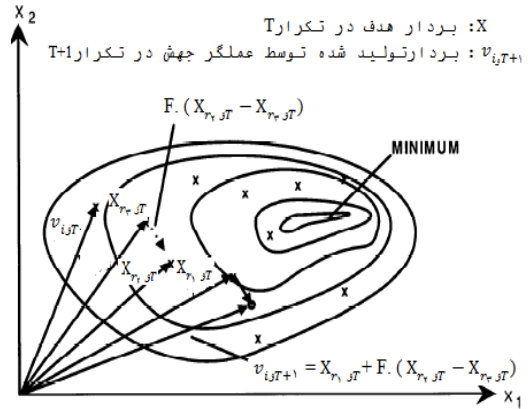
$$u_{i,T+1} = (u_{1i,T+1}, u_{2i,T+1}, \dots, u_{Di,T+1}) \quad (17)$$

$$u_{ji,T+1} = \begin{cases} V_{ji,T+1} & \text{if } rand_j(0,1) \leq CR \text{ or } j = j_{rand} \\ X_{ji,T} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

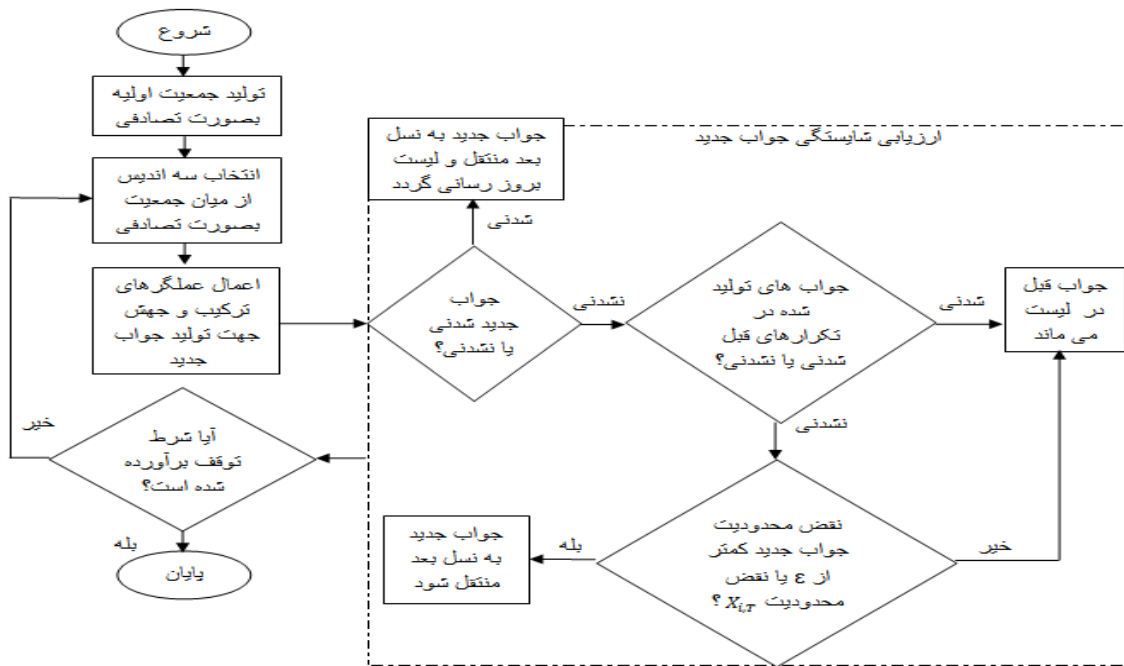
$$J = 1, 2, \dots, D \quad (19)$$



شکل ۴- مثال از فرایند ترکیب برای ۷ بعدی



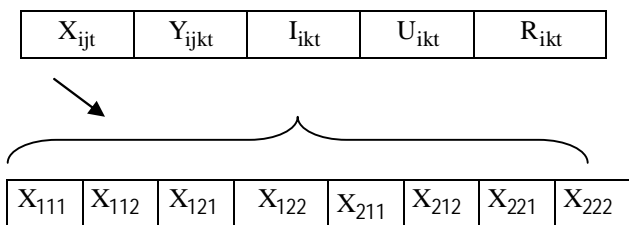
شکل ۳- یک نمونه دوبعدی برای اپراتور جهش



شکل ۵- ساختار الگوریتم تکامل تفاضلی پیشنهادی

تفاضل از یک مقدار از پیش تعیین شده مثل اپسیلون^{۲۷} تعریف می‌کنیم. این تفاضل با توجه به $h(X) \leq 0$ که در رابطه (۲۰) است، باید منفی باشد مثلاً محدودیت $\sum_{k=1}^k Y_{ijkt} = X_{ijkt}$ به صورت $\sum_{k=1}^k Y_{ijkt} - X_{ijkt} - \varepsilon < 0$ تعریف می‌کنیم. این نشان‌دهنده این است که حداکثر اختلاف بین $\sum_{k=1}^k Y_{ijkt}$ و X_{ijkt} باید از ε کمتر باشد تا به جواب برسیم. پس تفاضل محدودیت از ε باید عددی منفی به دست آید. اگر حاصل عددی مثبت باشد، میزان تفاوت تفاضل محدودیت از ε با صفر را نقض محدودیت گویند. جمع این نقض‌ها را مجموع نشدنی‌ها می‌نامند.

با توجه به معادلات (۱) الی (۱۲) مسئله زنجیره تامین، یک مسئله خطی صحیح مختلط^{۲۶} است که در آن متغیرهای تصمیم به دو دسته متغیرهای پیوسته $(X_{ijkt}, Y_{ijkt}, U_{ikt}, R_{ikt}, I_{ikt})$ و متغیر صفر و یک قابل تفکیک هستند و اکثر محدودیت‌ها به حالت تساوی می‌باشد. از آنجایی که دشواری حل مسئله مذکور ناشی از تساوی بودن اکثر محدودیت‌ها است و در فضای پیوسته، هیچ‌وقت تساوی بین دو متغیر اتفاق نمی‌افتد چون در فضای پیوسته حاصل به صورت صفر مطلق نیست؛ بنابراین، محدودیت‌هایی که رابطه تساوی دارند را به صورت



شکل ۶- نمونه‌ای از نحوه نمایش جواب

مقاله یک جواب به صورت یک بردار متشکل از متغیرهای مسئله تعریف می‌شود. در مسئله موردنظر متغیرهای پیوسته عبارت‌اند از:

$$X_{ijt}, Y_{ijkt}, U_{ikt}, R_{ikt}, I_{ikt}$$

جواب به صورت برداری متشکل از متغیرهای بالا به ترتیب از چپ به راست تعریف می‌شود. هر متغیر به تعداد ضرب اندیس‌های خود، متغیر دارد. مثلاً متغیر X_{ijt} ، به تعداد $i \times j \times t$ متغیر دارد. پس هر متغیر بالا خود شامل $i \times j \times t$ متغیر است. اگر به طور مثال $i=2, j=2, t=2$ باشند در جواب مسئله، متغیر X_{ijt} شامل ۸ متغیر می‌باشد. نمونه‌ای از نحوه نمایش بردار جواب در شکل ۶ ارائه شده است.

متغیر Z_{ij} جدا از این پنج متغیر تعریف می‌شود به این صورت که یک جواب برداری از پنج متغیر بالا است و حالت‌های مربوط به متغیر Z_{ij} بعد از تولید شدن متغیر X_{ijt} ، بررسی می‌شوند. اگر مقدار متغیر X_{ijt} در کل دوره زمانی مثبت باشد آنگاه متغیر Z_{ij} مربوطه یک است و در غیر این صورت مقدار متغیر Z_{ij} صفر می‌باشد. زیرا زمانی که مقدار متغیر X_{ijt} مثبت باشد، نشان‌دهنده این است که محصول i در کارخانه j تولید شده است و در غیر این صورت، بدان معنی است که محصول i در کارخانه j تولید نشده است.

۲. تولید جمعیت اولیه

به‌طور کلی کیفیت جواب‌های آغازین، بر عملکرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری تأثیر بسزایی دارد. بنابراین، طراحی روشی مؤثر برای تولید جواب‌های اولیه از اهمیت بالایی برخوردار است. از اینرو، در الگوریتم پیشنهادی، برای تولید جمعیت اولیه (به تعداد N) روش تصادفی طراحی شده است که با توجه به اینکه همه متغیرهای

ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، ساختار پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم تکامل تفاضلی، طراحی شده است. مطابق با شکل ۵، الگوریتم پیشنهادی با دو ابتکار، مشکل تک هدفه و بدون محدودیت بودن الگوریتم DE حل نموده است. با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف برای جواب جدید به دست آمده، از نظر اینکه جواب جدید شدنی است یا خیر؟ و جواب‌های به دست آمده در تکرارهای قبلی شدنی بوده‌اند یا خیر؟ مشکل بدون محدودیت بودن الگوریتم DE، برای مسئله موردنظر برطرف شد. با به‌روزرسانی^{۲۸} لیست‌های جواب، توسط روش رتبه‌بندی نامغلوب^{۲۹} مشکل تک هدفه بودن این الگوریتم برطرف می‌شود و میزان بهبود در کیفیت جواب‌ها افزایش می‌یابد. در راه حل پیشنهادی با در نظر گرفتن لیست‌های متناظر برای هر عضو از جمعیت و رتبه‌بندی کردن آنها، جواب‌های خوب حفظ می‌شود و زمینه برای یافتن جواب‌های با کیفیت بالا فراهم می‌آید.

۳-۱ تعریف روش رتبه‌بندی نامغلوب

در روش رتبه‌بندی نامغلوب اعضای جامعه براساس درجه نامغلوب بودن رتبه‌بندی می‌شوند. ابتدا تمام اعضای نامغلوب جامعه شناسایی شده و علامت‌گذاری می‌شوند. این اعضا در صدر فهرست قرار گرفته و رتبه یک به آنها داده می‌شود. سپس این اعضا کنار گذاشته شده و اعضای نامغلوب بعدی شناسایی شده و رتبه ۲ می‌گیرند. این روند همچنان ادامه می‌یابد تا تمام جامعه رتبه‌بندی شوند در اینجا رتبه هر عضو ملاک انتخاب خواهد بود [۱۷].

مراحل الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد:

۱. نحوه نمایش جمعیت جواب

یکی از مهم‌ترین تصمیماتی که در زمان طراحی یک الگوریتم فرا ابتکاری می‌بایست اتخاذ شود، نحوه نمایش جواب‌ها^{۳۰} و نیز چگونگی برقراری ارتباطی مؤثر، یکتا و قابل شناسایی میان جواب‌ها و فضای جستجوی مسئله مورد بررسی است. در این

مسئله مورد نظر از نوع کالا هستند و همه آنها به جز Z_{ij} مثبت می‌باشند، و هم‌چنین با توجه به اینکه پارامتر تقاضا به صورت توزیع یکنواخت بین ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته شده، با سعی و خطا به این نتیجه می‌توان رسید که باید مقادیر متغیرها به‌طور تصادفی بین صفر و حداکثر (۱۰/تقاضا) تولید شوند. این بدان معنی است که ۱۰٪ حداکثر تقاضا می‌شود، حداکثر مقداری که متغیر به خود می‌گیرد.

۳. تولید یک جواب جدید

همان‌طور که بیان شد، به تعداد N ، جواب اولیه به‌صورت تصادفی تولید می‌کنیم. هر یک از این جواب‌های اولیه را، به لیست متناظر با آن جواب منتقل می‌کنیم. بنابراین به تعداد N عدد لیست وجود خواهد داشت. در هر تکرار، برای هر یک از جواب‌ها، سه اندیس r_1 ، r_2 و r_3 را با توزیع یکنواخت گسسته بین ۱ تا N به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کنیم. سپس برای هر یک از اندیس‌ها، به لیست جواب ممکن متناظر با آن اندیس رجوع می‌کنیم. بردار جوابی که در لیست متناظر وجود دارد را برای تشکیل جواب جدید، توسط عملگر جهش استفاده می‌کنیم.

با توجه به رابطه (۱۶)، هربار F را عددی مثبت بین صفر تا یک در نظر و الگوریتم اجرا شد. اعدادی مثل $0/1$ و $0/2$ و $0/3$ در نظر گرفته شد ولی مشاهده شد که با در نظر گرفتن $F=0/5$ مسئله مورد نظر بهتر و سریع‌تر به جواب می‌رسد. بردار $V_{i,T+1}$ از اپراتور جهش به‌صورتی که در الگوریتم DE توضیح داده شد، به‌دست می‌آید.

بردار $u_{i,T+1}$ را به شیوه اپراتور ترکیب، در الگوریتم DE ساخته و برای آن از توزیع برنولی استفاده می‌کنیم. به این صورت که CR برابر $0/5$ فرض می‌شود یعنی با احتمال $0/5$ بردار $u_{i,T+1}$ مقدار متغیر خود را از بردار $V_{i,T+1}$ می‌گیرد و با احتمال $0/5$ هم مقدار متغیر خود را از بردار $X_{i,T}$ می‌گیرد. با بررسی‌های متعدد این نتیجه حاصل شد که با احتمال $0/5$ سرعت همگرایی به جواب سریع‌تر و بهتر می‌شود. بدین ترتیب با استفاده از عملگر جهش و بعد از آن عملگر ترکیب یک

جواب جدید تولید می‌شود.

۴. محاسبه مقادیر شایستگی

به‌طور معمول، در الگوریتم‌های فرا ابتکاری هر جواب در هر مرحله با استفاده از تابع شایستگی ارزیابی و مقدار شایستگی آن محاسبه می‌شود. در این مقاله نیز مانند سایر مسایل چند هدفه از توابع هدف مسئله که توسط رابطه (۱) و (۲) بیان شده‌اند، به عنوان توابع شایستگی استفاده می‌شود.

برحسب اینکه جواب جدید تولید شده در تکرار $T+1$ متناظر با عضو i ام جمعیت یعنی بردار $u_{i,T+1}$ شدنی یا نشدنی باشد برای مسئله تولید و توزیع، ممکن است چهار حالت پیش آید:

۱. جواب جدید ($u_{i,T+1}$) شدنی باشد ولی کلیه جواب‌های تولید شده در تکرارهای ۱ تا T متناظر با عضو i ام جمعیت نشدنی باشند، در این حالت $u_{i,T+1}$ جایگزین جواب $X_{i,T}$ در نسل بعد شده و وارد لیست جواب‌های شدنی متناظر با عضو i -ام (S_i) می‌شود. بدیهی است که چون تاکنون جواب شدنی به‌دست نیامده، این لیست خالی بوده و اکنون با یک جواب پر می‌شود. سپس با استفاده از روش رتبه‌بندی نامغلوب، جواب‌ها را از نظر نامغلوب بودن، رتبه‌بندی نموده و آنهایی را که رتبه یک پیدا کرده‌اند (که همان جواب‌های شدنی نامغلوب برتر، متناظر با عضو i ام هستند)، را نگه داشته و بقیه را حذف می‌کنیم. با این کار لیست S_i به‌روزرسانی می‌شود. چون به جواب شدنی رسیده‌ایم، جواب حاضر ($u_{i,T+1}$) را به یک لیست دیگر، که مجموعه جواب‌های شدنی نامغلوب (ND) را در بردار نیز اضافه می‌کنیم. سپس در پایان هر تکرار، از روش رتبه‌بندی نامغلوب استفاده می‌کنیم تا جواب‌های نامغلوب شدنی برتر را در لیست ND پیدا کند. با این کار لیست ND به روز رسانی می‌شود. بدیهی است که این لیست در بردارنده بهترین جواب‌ها در تکرار آخر خواهد بود.

۲. جواب جدید ($u_{i,T+1}$) نشدنی باشد و کلیه جواب‌های تولید شده در تکرارهای ۱ تا T متناظر با عضو i ام جمعیت نشدنی باشند. در این حالت اگر مقدار مجموع نشدنی‌های $u_{i,T+1}$ از یک مقدار از پیش تعریف شده‌ای

نامغلوب، در پایان تکرار آخر خواهد بود. پس در پایان از بین جواب‌های شدنی، لبه نامغلوب را تشکیل می‌دهیم. اینها جواب‌های شدنی هستند که هیچ کدام بر دیگری غالب نیستند و جواب‌های نهایی و بهینه ما را تشکیل می‌دهند.

۴- نتایج محاسباتی

با استفاده از مسائل نمونه تصادفی متعدد، عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای مسائل با ابعاد کوچک در مقایسه با نرم‌افزار LINGO که به صورت قطعی به حل مسائل می‌پردازد، ارزیابی می‌شود. ماهیت الگوریتم حل مسئله، رسیدن به بهترین جواب در یک زمان قابل قبول می‌باشد. از اینرو، پارامتر زمان و مقدار جواب بهینه به عنوان عامل اصلی مقایسه و نتیجه‌گیری مطرح خواهند بود. با توجه به پیچیدگی حل مدل زنجیره تامین دو سطحی دو هدفه به‌خصوص در ابعاد بزرگ، محاسبه مقدار بهینه بسیار مشکل است. بنابراین جواب‌های الگوریتم پیشنهادی (MODE) با یک حد نزدیک به بهینه که توسط نرم‌افزار LINGO حاصل شده، مقایسه می‌گردد.

الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه، در محیط MATLAB 7.11 برنامه نویسی شده است. پردازشگر اجرا کننده الگوریتم پیشنهادی و مدل ریاضی LINGO10 یک کامپیوتر با مشخصات ۲/۳۰ گیگا هرتز و ۴ گیگا بایت رم می‌باشد.

۴-۱ روش تولید مسائل تصادفی

مسائل نمونه در سه گروه با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به صورت تصادفی ایجاد شده‌اند. نحوه انتخاب ابعاد مسائل انتخابی با توجه به تأثیر چهار پارامتر تعداد نوع محصول، کارخانجات تولیدی، مراکز توزیع و دوره زمانی، پیچیده خواهد بود. با این حال جهت مقایسه‌های هدفمندتر، ۱۲ مسئله با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ، که به نوبت تغییرات دو پارامتر را نشان می‌دهد تعیین شده که در جدول ۳ ابعاد مسائل ارائه شده است. اطلاعات لازم برای تولید مسایل نمونه در جدول ۴ ارائه شده است. در این مقاله، برای هر یک از پارامترهای مسئله مقادیر تصادفی با توزیع یکنواخت

مثل اپسیلون کمتر باشد، به دلیل کوچکی تفاوت، از آن چشم پوشی می‌کنیم و $u_{i,T+1}$ را در لیست S_i قرار می‌دهیم تا این فاصله و شکاف هر بار کمتر شود و بتوانیم از این شکاف خارج شویم. در غیر این صورت اگر جمع مقادیر نشدنی‌های $u_{i,T+1}$ کمتر از جمع مقادیر نشدنی‌های $X_{i,T}$ باشد، با توجه به اینکه می‌دانیم هر جوابی که جمع نشدنی‌های آن کمتر باشد به شدنی بودن، نزدیک‌تر است، $u_{i,T+1}$ را جایگزین جواب $X_{i,T}$ در نسل بعد نموده و وارد لیست S_i می‌کنیم. در غیر این صورت از $u_{i,T+1}$ به دست آمده، صرف نظر کرده و به یافتن جواب جدید مربوط به عضو $i+1$ ام جمعیت می‌پردازیم.

۳. اگر جواب جدید ($u_{i,T+1}$) شدنی باشد و قبل از تکرار T نیز به جواب شدنی طی تکرارهای 1 تا T متناظر با عضو i ام جمعیت رسیده باشیم، آنگاه $u_{i,T+1}$ را جایگزین جواب $X_{i,T}$ در نسل بعد می‌کنیم و به لیست S_i و لیست ND اضافه می‌کنیم. سپس با استفاده از روش رتبه‌بندی نامغلوب، لیست S_i را برای تکرار بعد و لیست ND را در پایان هر تکرار، به روز رسانی می‌کنیم.

۴. اگر جواب جدید ($u_{i,T+1}$) نشدنی باشد و قبل از تکرار T نیز به جواب شدنی طی تکرارهای 1 تا T متناظر با عضو i ام جمعیت رسیده باشیم، از $u_{i,T+1}$ صرف نظر می‌کنیم (چون این جواب نشدنی است و قبلاً به جواب شدنی رسیده‌ایم)، سپس به یافتن جواب جدید مربوط به عضو $i+1$ ام جمعیت می‌پردازیم.

پس هر وقت که به جواب شدنی رسیدیم باید دو لیست را به روز رسانی کنیم. یکی لیست S_i ، هر بار که جواب شدنی جدید به آن وارد شد و دیگری لیست ND که آن را در پایان هر تکرار، به روز رسانی می‌کنیم.

۵. انتخاب جواب

در پایان هر تکرار، لیست ND را با استفاده از روش رتبه‌بندی نامغلوب به روز رسانی می‌کنیم. با این کار در پایان هر تکرار، جواب‌های شدنی نامغلوب برتر را در دست داریم. بدیهی است که این لیست در بردارنده بهترین جواب‌های شدنی

جدول ۳- روش تولید مسائل تصادفی

شماره مسئله	بعد مسئله	شماره مسئله	بعد مسئله	شماره مسئله	بعد مسئله
کوچک	$(i \times j \times k \times t)$	متوسط	$(i \times j \times k \times t)$	بزرگ	شماره مسئله
۱	$2 \times 2 \times 2 \times 2$	۵	$2 \times 4 \times 2 \times 2$	۹	$3 \times 3 \times 3 \times 3$
۲	$2 \times 2 \times 3 \times 2$	۶	$2 \times 2 \times 3 \times 3$	۱۰	$4 \times 3 \times 4 \times 3$
۳	$2 \times 2 \times 2 \times 3$	۷	$2 \times 2 \times 2 \times 4$	۱۱	$3 \times 3 \times 4 \times 4$
۴	$3 \times 2 \times 2 \times 2$	۸	$2 \times 3 \times 2 \times 3$	۱۲	$3 \times 4 \times 3 \times 4$

جدول ۴- نحوه تولید پارامترهای مسایل نمونه

نام پارامتر	مقدار پارامتر	نام پارامتر	مقدار پارامتر
μ_{ij}	$U[-1,1]$	N_{jkt}, M_{ikt}	$10+U[1,10]$
$CP_{ij}, Ct_{ij}, P_{it}, CV_{ij}, ST_{ijk}$ $PT_{ij}, D_{ikt}, CS_{ivf_{ij}}, CO_{ikt}, ch_{ikt}$	$U[1,10]$	DT_{ikt}	$U[100,200]$

جدول ۵- میانگین مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی حل مسائل نمونه تصادفی با ابعاد کوچک

شماره مسئله	LINGO		MODE		شماره مسئله
	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	زمان (ثانیه)	میانگین تابع هدف اول	
۱	۰	۱۱۴/۳۸	۴	-۳۰۴/۶۹	۱
۲	۰	۷۳۲/۹۰	۵	-۵۳۶/۳۰	۲
۳	۰	۳۳۹/۲۹	۹	-۵۳۱/۸۸	۳
۴	۰	۲۶۱/۸۸	۱۲	-۴۹۷/۳۴	۴

لینگو، به عنوان داده وارد نمودیم.

۲-۴ مفروضات و پارامترهای الگوریتمها

برای تنظیم الگوریتم، آزمایش‌های زیادی با مجموعه مقادیر مختلف پارامترها انجام گرفته است که در پایان با استفاده از مجموعه مقادیر زیر بهترین نتایج حاصل شده است:

در الگوریتم تکامل تفاضلی پیشنهادی اندازه جمعیت و تعداد تکرارها برای مسائل نمونه کوچک به ترتیب برابر با ۵۰ و ۲۰۰ و برای مسائل نمونه متوسط به ترتیب برابر با ۸۰ و ۵۰۰ و برای مسائل نمونه بزرگ به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۹۰۰ قرار داده شده است. سایر پارامترها همانند CR و آستانه و E و F برای تمام مسائل

بین ۱ تا ۱۰ تعیین شده، به جز برای پارامتر ظرفیت حمل و ظرفیت نگهداری که مقادیر را به صورت توزیع یکنواخت $[1,10]$ در نظر گرفته و نیز برای پارامتر زمان تحویل توزیع یکنواخت $[100,200]$ و هم چنین برای پارامتر سطح کیفیت اولیه توزیع یکنواخت $[-1,1]$ مدنظر قرار گرفته شده است.

همان طور که توضیح داده شد الگوریتم مقدار پارامترها را به صورت تصادفی تولید می‌کند. برای اینکه جواب الگوریتم پیشنهادی با نرم افزار لینگو بتواند قابل مقایسه باشد، برای حل هر یک از مسائل بالا، ابتدا مسئله را با الگوریتم حل نموده و سپس مقادیر تصادفی که الگوریتم برای مقادیر پارامترها در نظر گرفته بود را به عنوان داده برای حل مسئله مورد نظر توسط

جدول ۶- میانگین مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی حل مسایل نمونه تصادفی با ابعاد متوسط

شماره مسئله	MODE		LINGO		شماره مسئله
	میانگین تابع هدف دوم	میانگین تابع هدف اول	زمان (ثانیه)	تابع هدف دوم	
۵	۲۵۸/۵۰	-۵۶۳/۰۹	۷۰	۳۰۴/۶	۰
۶	۴۱۳/۹۱	-۶۴۹/۴۲	۹۷	۲۸۱/۱۶	۰
۷	۳۳۶/۵۸	-۶۰۸/۷۱	۱۲۵	۲۱۹/۴۱	۰
۸	۲۹۱/۸۴	-۷۲۷/۵۸	۲۴۳	۳۱۳/۷۸	۰

جدول ۷- میانگین مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی حل مسایل نمونه تصادفی با ابعاد بزرگ

شماره مسئله	MODE		LINGO		شماره مسئله
	میانگین تابع هدف دوم	میانگین تابع هدف اول	زمان (ثانیه)	تابع هدف دوم	
۹	۷۹۷/۴۵	-۹۷۱/۸۴	>۷۲۰۰	-	-
۱۰	۱۳۲۹/۹۲	-۱۸۷۸/۵۶	-	-	-
۱۱	۹۸۸/۴۱	-۲۰۳۶/۰۶	-	-	-
۱۲	۳۱۰۹/۳۹	-۲۴۱۴/۴۳	-	-	-

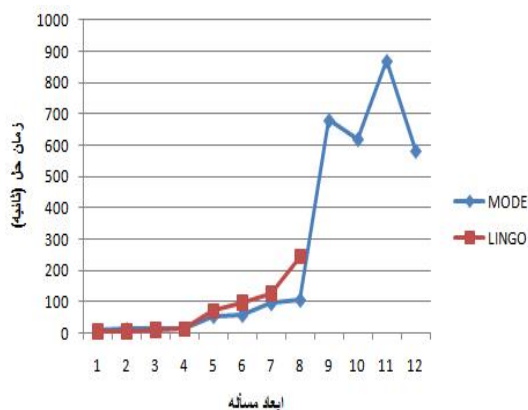
هر مسئله می‌یابد.

شکل ۶ مقایسه میان مقدار تابع هدف دوم در الگوریتم پیشنهادی با لینگو را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ابعاد مسئله، مقدار تابع هدف نیز روند صعودی داشته است. مقایسه میان زمان‌های محاسباتی صرف شده توسط الگوریتم پیشنهادی و لینگو در حل مسایل با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ در شکل ۷ نمایش داده شده است. معادله (۲۱) بیانگر فاصله حل به‌دست آمده از الگوریتم MODE و حل بهینه است، که به‌عنوان معیار کارایی مورد استفاده قرار گرفته است. این معیار نشان‌دهنده میزان اعتبار الگوریتم توسعه داده شده است. برای محاسبه معیار، از متوسط مقدار تابع هدف در اجرای الگوریتم استفاده شده است. در این رابطه منظور از تابع هدف برای LINGO و متوسط تابع هدف برای الگوریتم پیشنهادی، تابع اول و هم تابع دوم است. بدین‌صورت که هر بار که تابع اول را برای LINGO در نظر می‌گیریم، متوسط همان تابع اول را برای الگوریتم

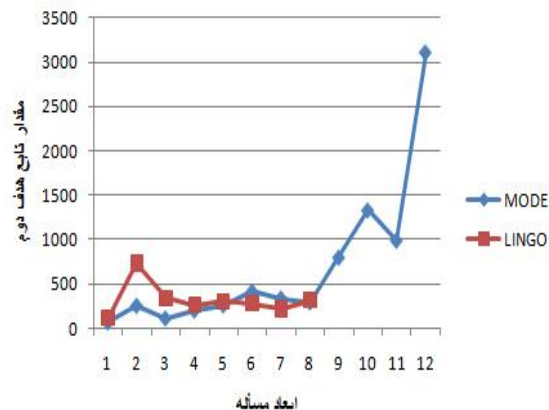
به‌ترتیب ۰/۵، ۰/۱، ۱ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است. از آستانه برای تعریف کردن صفر در فضای پیوسته استفاده شده؛ زیرا در فضای پیوسته صفر مطلق وجود ندارد و تعریف نمودن آستانه ۰/۱، به این معنی است که اگر قدر مطلق مقادیر متغیرها کمتر از ۰/۱ باشد مقدار متغیر صفر در نظر گرفته شود.

۴-۳ نتایج عددی

به‌منظور آزمون کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از اجرای آن در مسائل تولید شده با نتایج حل دقیق به‌دست آمده از نرم‌افزار LINGO10 مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از این آزمایشات و حل دقیق به‌دست آمده در جداول ۵ و ۶ و ۷ نمایش داده شده‌اند. در این جداول، میانگین مقدار تابع هدف اول و دوم به‌دست آمده و زمان‌های محاسباتی صرف شده توسط الگوریتم پیشنهادی و LINGO برای حل هر مسئله، و درصد خطا ارائه شده است. متوسط مقدار تابع هدف برای الگوریتم پیشنهادی بیان می‌گردد زیرا الگوریتم، چندین جواب بهینه پارتو را برای



شکل ۷- مقایسه زمان حل MODE و LINGO



شکل ۶- مقایسه تابع هدف دوم جواب‌های به دست آمده از MODE و LINGO

به مراکز توزیع حمل می‌شوند. هم‌چنین فرض شده است تقاضا قطعی و از نوع پس‌افت باشد یعنی تقاضای برآورده نشده که مشتری برای جبران این کمبود منتظر می‌ماند.

حل بسیاری از مسائل، مستلزم بهینه‌سازی هم‌زمان چندین هدف است که اغلب نمی‌توان در آنها، یک راه حل را به عنوان بهترین راه حل مسئله معرفی کرد. بهترین روش برای حل مسائل چند هدفه، پیشنهاد دادن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های مغلوب نشده - است که هر یک از آنها اهداف را در سطح قابل قبولی، برآورده می‌سازند. امروزه با بزرگ شدن مسائل و اهمیت یافتن سرعت رسیدن به پاسخ، دیگر روش‌های کلاسیک در زمان محاسباتی معقول قادر به حل بسیاری از مسائل نیستند. در همین راستا، الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری و الگوریتم‌های تکاملی به عنوان جایگزینی برای روش‌های کلاسیک به کار برده می‌شوند. در واقع الگوریتم‌های هیوریستیک برای یافتن تعادلی بین یافتن حل بهینه و زمان حل، به وجود آمده‌اند و هدف اصلی آنها یافتن حل بهینه یا تقریباً بهینه در زمان قابل قبول است. از اینرو، برای حل مدل پیشنهادی، الگوریتم تکامل تقاضای توسعه داده شده است. کارایی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از مسایل نمونه متعددی که به صورت تصادفی ایجاد شده‌اند با نرم‌افزار LINGO مقایسه شده است. نتایج عددی بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی است.

به عنوان تحقیقات آتی می‌توان تقاضای محصول را احتمالی

پیشنهادی در نظر می‌گیریم و به همین ترتیب برای تابع هدف دوم:

$$\% \text{ error} = \frac{\text{مقدار تابع هدف LINGO} - \text{متوسط مقدار تابع هدف MODE}}{\text{مقدار تابع هدف LINGO}} \times 100 \quad (21)$$

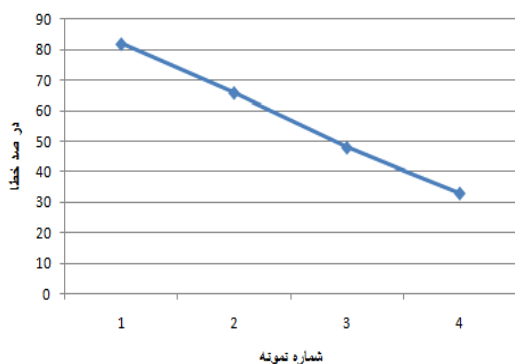
در جدول ۸ برای مسئله شماره ۱ (حالت $2 \times 2 \times 2 \times 2$) با جمعیت اولیه ۳۰، تعداد تکرارهای مختلف در نظر گرفته شده است. همان‌طور که شکل ۸ و ۹ نشان می‌دهند اختلاف بین مقدار تابع هدف در الگوریتم و لینگو با افزایش تعداد تکرارها رو به کاهش است و این کارا بودن الگوریتم را نشان می‌دهد. در محاسبات مدل چون مقدار تابع اول همواره صفر شده، میزان خطا و فاصله حل به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی و حل بهینه (LINGO) را فقط برای تابع دوم محاسبه نمودیم.

۵- نتیجه‌گیری

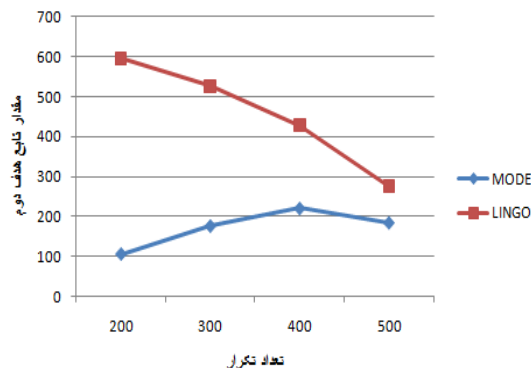
این مقاله به بررسی مسئله زنجیره تامین شامل دو سطح تولید و توزیع در حالت چند دوره‌ای چند محصولی و با اهداف بیشینه‌سازی سود زنجیره و کیفیت محصولات پرداخته است. یک مدل ریاضی با متغیرهای صحیح و پیوسته برای تولید محصول در چندین کارخانه و ارسال آن به چندین مرکز توزیع طراحی شده است. مراکز توزیع برحسب ظرفیت و هزینه نگهداری با هم تفاوت دارند. تمام محصولات در هر دوره زمانی

جدول ۸- مقایسه مقدار تابع هدف دوم در تکرارهای مختلف

درصد خطا	LINGO	MODE	تعداد تکرار
	مقدار تابع هدف دوم	میانگین تابع هدف دوم	
% ۸۲	۵۹۶/۱۸	۱۰۴/۷۱	۲۰۰
% ۶۶	۵۲۶/۲۰	۱۷۶/۰۵	۳۰۰
% ۴۸	۴۲۸/۲۳	۲۲۰/۸۷	۴۰۰
% ۳۳	۲۷۵/۳۸	۱۸۴/۱۸	۵۰۰



شکل ۹- خطای الگوریتم پیشنهادی



شکل ۸- مقایسه MODE و LINGO در تکرارهای مختلف

تعمیم این الگوریتم استفاده شد را می‌توان در الگوریتم ابتکاری دیگری مثل الگوریتم دسته ذرات اعمال نمود تا الگوریتم چند هدفه دیگری برای حل مسئله توسعه داده شود.

در نظر گرفت تا به مسئله دنیای واقعی نزدیک‌تر شود. هم‌چنین حل مسئله مورد نظر می‌تواند با روش‌های دیگر اعم از دقیق، ابتکاری و فرا ابتکاری مدنظر قرار گیرد و یا متدولوژی که در

واژه نامه

- | | | |
|---------------------------------|--|--|
| 1. supply chain | 12. Park et al. | 22. dimensional |
| 2. supply chain management(SCM) | 13. Li et al. | 23. iteration |
| 3. Hand Field | 14. Lieckens and Vandaele | 24. diversity |
| 4. Gebennini et al. | 15. mixed integer linear program(MILP) | 25. multi-objective differential evolution |
| 5. Das and Sengupta | 16. Pareto-optimal set | 26. mixed integer linear program(MILP) |
| 6. Grossmann and You | 17. distribution centers | 27. epsilon |
| 7. Rizk et al. | 18. differential evolution | 28. update |
| 8. Lee and Kim | 19. Goldberg | 29. non-dominated sorting |
| 9. Jayaraman and Pirkul | 20. continuous spaces | 30. solution representation |
| 10. Jolai et al. | 21. Storm and Price | |
| 11. Bilgen | | |

مراجع

- Hand Field, R.B., and Nichols, R., "Introduction to Supply Chain Management", New Jersey, Prentice Hall, pp.1-3, 1999.
- Gebennini, E., Gamberini, R., and Manzini, R., "An Integrated Production-Distribution Model for the Dynamic Location and Allocation Problem with Safety Stock Optimization", *International Journal of Production Economics*, Vol. 122, pp. 286-304, 2009.
- Das, K., and Sengupta, S., "A Hierarchical Process Industry Production-Distribution Planning Model",

- International Journal of Production Economics*, Vol. 117, pp. 402-419, 2009.
4. You, F., and Grossmann, I. E., "Design of Responsive Supply Chain Under Demand Uncertainty", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 32 (12), pp. 3090-3111, 2008.
 5. Rizk, N., Martel, A., and D'Amours, S., "Multi-item Dynamic Production-Distribution Planning in Process Industries with Divergent Finishing Stages", *Computers & Operations Research*, Vol. 33, pp. 3600-3623, 2006.
 6. Lee, Y.H., and Kim, S. H., "Production-Distribution Planning in Supply Chain Considering Capacity Constraints", *Computer and Industrial Engineering*, Vol. 43, pp. 169-190, 2002.
 7. Jayaraman, V., and Pirkul, H., "Planning and Coordination of Production and Distribution Facilities for Multiple Commodities", *European Journal of Operation Research*, Vol. 133, pp. 394-408, 2001.
 ۸. پویا، "طراحی مدل ریاضی برنامه‌ریزی تولید و توزیع شرکت آزمایش"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تهران، دانشگاه تربیت مدرس ۱۳۸۳.
 9. Naimi Sadigh, A., Mozafari, M., and Karimi, B., "Manufacturer-Retailer Supply Chain Coordination: A Bi-Level Programming Approach", *Advances in Engineering Software*, Vol. 45, pp. 144-152, 2012.
 10. Jolai, F., Razmi, J., and Rostami, N. K. M., "A Fuzzy Goal Programming and Meta Heuristic Algorithms for Solving Integrated Production: Distribution Planning Problem", Springer, Original Paper, 2010.
 11. Bilgen, B., "Application of Fuzzy Mathematical Programming Approach to the Production Allocation and Distribution Supply Chain Network Problem", *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, pp. 4488-4495, 2010.
 12. Park, S., Lee, T., and Sung, C., "A Three-Level Supply Chain Network Design Model with Risk-Pooling and Lead Times", *Transportation Research Part E*, Vol. 46, pp. 563-581, 2010.
 13. Li, H., Hendry, L., and Teunter, R., "A Strategic Capacity Allocation Model for a Complex Supply Chain: Formulation and Solution Approach Comparison", *International Journal of Production Economics*, Vol. 121, pp. 505-518, 2009.
 14. Lieckens, K., and Vandaele, N., "Reverse Logistics Network Design with Stochastic Lead Times", *Computers & Operations Research*, Vol. 34, pp. 395-416, 2007.
 15. Amiri, A., "Designing a Distribution Network in a Supply Chain System: Formulation and Efficient Solution Procedure", *European Journal of Operational Research*, Vol. 171, pp. 567-576, 2006.
 16. Rezaei, J., and Davoodi, M., "Multi-Objective Models for Lot-Sizing with Supplier Selection", *International Journal of Production Economics*, Vol. 130, pp. 77-86, 2011.
 17. Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
 18. Price, K., and Storn, R. "Differential Evolution-A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces", Berkeley, CA, Tech. Rep. TR-95-012, 1995.