ارائه یک روش ابتکاری برای حل مسئله زنجیره تامین دوسطحی دوهدفه

محدثه ربیعه[1*]، بیژن خیام باشی[2]، حسین رضائی دولت‌آبادی[3] و سید مجتبی سجادی[4]

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 پیداکردن راه‌های بهتری برای مدیریت جریان مواد در سازمان‌هایشان، جهت پیشرفت و حفظ بقای خود می‌کنند. در این مقاله به‌بررسی مسئله چند محصولی چند دوره‌ای در یک زنجیره تامین دو-سطحی؛ شامل چند تولیدکننده و توزیع‌کننده پرداخته شده‌است. با اهداف بیشینه‌سازی سودکل زنجیره و کیفیت محصولات، مدلی جدید برای مسئله ارائه شده‌است. با توجه به اینکه روش‌های بهینه‌سازی سنتی، به‌آسانی امکان درنظر گرفتن بیش از یک هدف در بهینه‌سازی را نمی‌دهند و در عوض روش‌های ابتکاری ابزار کاربرد بهینه‌سازی چند هدفه را به‌آسانی و با کارایی بالا فراهم می‌نمایند و سبب کوتاه‌تر شدن زمان رسیدن به جواب بهینه و یا نزدیک به بهینه می‌شوند، از اینرو بهینه یاب جدیدی مبتنی بر الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل مدل پیشنهادی ارائه شده‌است. در بهینه یاب طراحی شده، از مفاهیم اساسی بهینه‌سازی چند هدفه، جهت هدایت عوامل جستجوگر در فضای جستجو به‌سمت منطقه بهینه استفاده شده‌است. کارایی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از مسائل نمونه تصادفی متعددی با نرم‌افزار LINGO مقایسه شده‌است. 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. Rabieh[1], B. Khayyam Bashi[2], H. Rezaie Dolatabadi[3] and S. M. Sajjadi[4]

1. Industrial Engineering, Payam Noor 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 فاصلهٔ بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان مسافت کمتری داشت در نتیجه توزیع کالاها، مسئلهٔ قابل توجهی به حساب نمی‌آمد و خرده‌فروشان به‌راحتی می‌توانستند کالاهای مورد نیاز خود را تهیه کنند، ولی امروزه تولید انبوه، افزایش تنوع کالاها، افزایش تعداد مصرف‌کنندگان و فاصلهٔ 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 ثابت‌تر و پایدارتر به‌نحوی است که می‌توان هدف از این رقابت را متمایز شدن و پیشی‌گرفتن 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 به‌دست آوردن سهم بیشتر در این رقابت است. صاحبان بسیاری از صنایع دریافتند که برای ادامه حضور در بازار تنها بهبود فرایندهای داخلی و انعطاف‌پذیری در توانایی‌های شرکت کافی نیست و توزیع‌کنندگان محصولات نیز باید ارتباط نزدیکی با سیاست‌های توسعهٔ بازار تولیدکننده داشته‌باشند. با چنین نگرش‌هایی رویکردهای زنجیرهٔ تأمین[1] و مدیریت آن پا به عرصه وجود نهاد. تعاریف مشابهی برای مدیریت زنجیرهٔ تأمین[2] ارائه شده که یکی از بهترین‌های آن توسط هند فیلد[3] مطرح شده است: "شبکه‌ای است که تمام فعالیت‌های مرتبط با جریان و تبدیل کالاها از مرحله ماده خام تا کالاهای نهایی و نیز جریان اطلاعاتی مرتبط با آنها را شامل می‌شود. مواد و اطلاعات هر دو در بالا و پایین شبکه جریان دارند" [۱].

با توجه به‌تعاریف ذکرشده 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 می‌تواند در کل زنجیره تأثیر زیادی داشته باشد. یکی از راهکارهایی که برای ارتباط بهینه‌تر و دقیق‌تر در زنجیرهٔ تأمین درنظر می‌گیرند مدل

کردن این عوامل توسط مدل‌های ریاضی و حل مدل توسط روش‌های بهینه‌یابی است تا بتوانند با توجه به تابع هدفی که تعیین می‌کنند کل زنجیرهٔ تأمین را بهینه سازند. مقالات مختلفی با تمرکز بر شبکه تولید و توزیع، به بررسی مدل‌سازی مسئلهٔ زنجیرهٔ تأمین پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. گبنیمی و همکاران[۴] یک مدل یکپارچهٔ 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 درنظر گرفتن تقاضای غیر قطعی و زمان حمل ونقل حل شده - است[۳]. گروس مان و یو[۶] یک مدل غیرخطی مختلط چنددوره ای را برای مسئله تولید وتوزیع زنجیرهٔ تأمین به وسیلهٔ توجه به انتخاب تأمین‌کننده و مکان کارخانجات، پیشنهاد داده‌اند [۴]. ریزک و همکاران[۷] یک مدل ریاضی برای حل مسئلهٔ تولید و توزیع با چندین مرحله را ارائه کرده‌اند، مدل آنها شامل چندین مرحلهٔ تولید است و به هزینه حمل ونقل بین مکان تولید و مراکز توزیع اهمیت داده می‌شود [۵]. لی و کیم[۸] نیز با درنظرگرفتن 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 وتوزیع را حداقل می‌نماید و محدودیت‌ها نیز مربوط به تقاضا و ظرفیت مراکز است [۷]. پویا به ارائه مدل ریاضی برنامه‌ریزی تولید و توزیع به‌صورت قطعی و فازی پرداخته است. این مدل به دنبال حداقل کردن هزینه‌های تولید، نگهداری وکمبود محصولات در انبارهای توزیع، هزینه‌های تولید و نگهداری قطعات، هزینه‌های خرید و نگهداری مواد خام و سایر هزینه‌های حمل ونقل می‌باشد. محدودیت‌های این مدل شامل محدودیت‌های بالانس موجودی، ظرفیت ماشین آلات، منابع در دسترس، ظرفیت نگهداری و ظرفیت توزیع است[۸].

تغییرات عمده در زمینهٔ بهینه‌سازی در طی سال‌های اخیر منجر به معرفی تعدادی از روش‌های غیرکلاسیک و مبتنی بر جستجوی تصادفی شده است. از جمله این روش‌ها الگوریتم‌های فرا ابتکاری هستند که سریع‌تر و بهتر از روش‌های سنتی به‌جواب می‌رسند. دراین گونه روش‌ها که معمولاً به‌علت پیچیدگی مسائل، ناتوانی و یا زمان‌بر بودن روش‌های دقیق در حل مسئله به آنها رجوع می‌کنیم، به‌طورکلی با یک الگوریتم جستجوی محلی، که با یک روش ابتکاری قادر است خود را از دام بهینهٔ 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 مسئلهٔ زنجیرهٔ تأمین ارائه شده است. نعیمی و همکاران یک زنجیرهٔ تأمین چند محصولی با یک تولیدکننده و یک خرده‌فروش را بررسی کرده-اند که تقاضا برای هر محصول به‌وسیله 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 وآن را با الگوریتم متاهیوریستیک 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 والگوریتم 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 مسئلهٔ تولید و توزیع در زنجیرهٔ 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 تامین سه سطحی از تأمین‌کنندگان و مراکز توزیع و

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 تامین سه سطحی از تأمین‌کنندگان وتولیدکنندگان 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 شبکهٔ توزیع در زنجیره تامین را طراحی کرده است. برای حل مدلLP طراحی شده از تکنیک ساده‌سازی لاگرانژی به‌دلیل 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 به‌دست می‌آید [۱۵]. در جداول ۱ و۲ مقایسه‌ای بین تحقیقات مختلف از نظر فرضیات، روش حل و ساختار زنجیره تامین و نوع مدل و تابع هدف‌های مورد استفاده انجام شده است.

این مقاله به بررسی مسئلهٔ زنجیرهٔ 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 مسئلهٔ زنجیرهٔ 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 شده‌است.

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. هیورستیک‌ها با استفاده از روش‌های توسعه، ارزیابی‌های کمتر و ارائه جواب‌هایی درمحدودیت‌های 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 به‌کار برده می‌شوند در واقع الگوریتم‌های هیوریستیکی برای یافتن توازنی بین یافتن حل بهینه و زمان حل، به‌وجود آمده اند 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 نمونهٔ 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 مسئلهٔ زنجیرهٔ تأمین دو سطحی معرفی می‌شود. زنجیرهٔ تأمین شامل چندین کارخانه و

جدول ۱- مرور روش‌های حل پیشنهاد شده در منابع

نویسنده	فرضیات	روش حل	سطوح زنجیره
داس و سنگوپتا [۳]	چنددوره‌ای، 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، درنظرگرفتن چند خط تولید در هر کارخانه و میزان تولید هر خط متفاوت است	شبیه‌سازی	تولید- توزیع
گبنیمی وهمکاران[۲]	چند تولیدکننده و توزیع کننده، 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 خرده فروش و مشتری، تاریخ تحویل به‌وسیله توزیع‌کننده مشخص می‌شود، تقاضا از نوع پس‌افت	الگوریتم‌ژنتیک، الگوریتم‌دسته‌ذرات، الگوریتم‌ژنتیک توسعه یافته	تولید-توزیع- خرده‌فروش- مشتری
پارک وهمکاران[۱۲]	چند تأمین‌کننده و تولیدکننده و خرده فروش، درنظر گرفتن ریسک موجودی و زمان تأخیر، هر مرکز توزیع از یک تأمین‌کننده و هر خرده فروش 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، چندتوزیع‌کننده، انبار در مراکز توزیع ولی برای کارخانجات درنظر 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]	چندمحصولی، چند تولیدکننده وخرده‌فروش، مخارج تبلیغ بر میزان تقاضا برای هر محصول موثر است، تقاضا غیرخطی	الگوریتم رقابتی	تولید- خرده فروش
رضائی و داودی [۱۶]	چند دوره‌ای، چند تأمین‌کننده و تولیدکننده، مسائل چندین سایز، درنظر داشتن مجاز بودن و نبودن کمبود موجودی	الگوریتم‌ژنتیک توسعه یافته	تأمین- تولید

مراکزتوزیع[۱۷](DCs) می‌باشد. ساختار زنجیره مربوطه در شکل ۱ آورده شده است.

۲-۱ فرضیات

- چند دوره‌ای
- چند محصولی
- دو سطح شامل چند تولیدکننده و چند توزیع‌کننده
- مراکز توزیع برحسب ظرفیت و هزینه نگهداری با هم تفاوت دارند.
- تمام محصولات در هر دوره زمانی به مراکز توزیع حمل می‌شوند.
- تقاضا قطعی واز نوع پس افت است یعنی تقاضای برآورده نشده که مشتری برای جبران این کمبود منتظر می‌ماند.

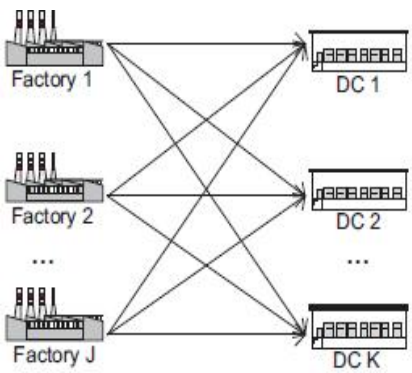
۲-۲ نمادها

نمادهای مورد استفاده در این مقاله به‌شرح زیر می‌باشد

i: علامت نوع محصول (i=1,…,I)

جدول ۲- تابع هدفهای مفروض در مرور منابع

	نویسنده							
تابع‌های هدف	داس وسنگو 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



شکل ۱- ساختار زنجیره تامین

j: علامت کارخانه (j=1,…,J)

t: علامت دورهٔ زمانی (t=1,…,T)

k: علامت مرکز توزیع (k=1,…,K)

۲-۳ پارامترها

cp_{ijt}: هزینه تولید محصول i در کارخانه j در دورهٔ 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 کارخانهj (منظور هزینه‌هایی است که به میزان تولید محصول بستگی ندارند مانند هزینه‌های سفارش دهی)

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

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 دورهt

Z_{ij}: برابر۱است اگرمحصول i در کارخانه j تولید شود و در غیر

این‌صورت 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.

۲-۵ مدل ریاضی

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

$$MAX\, Z_1 = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I} p_{it} \sum_{k=1}^{K} U_{ikt} - \{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} ct_{ijkt}\, Y_{ijkt} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} cv_{ij}\, Z_{ij} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} cp_{ijt}\, X_{ijt} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K} ch_{ikt}\, I_{ikt} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K} co_{ikt}\, U_{ikt} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I} cs_{it} \sum_{k=1}^{K} R_{ikt}\} \quad (۱)$$

$$MAX\, Z_2 = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} f_{ij0}\, e^{t\mu ij}\, X_{ijt} \quad (۲)$$

$$s.t.: \quad I_{ikt} \le M_{ikt} \qquad \forall i,k,t \quad (۳)$$

$$PT_{ij}\, X_{ijt} + ST_{ijk}\, Y_{ijkt} \le DT_{ikt} \qquad \forall i,j,k,t \quad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^{I} Y_{ijkt} \le N_{jkt} \qquad \forall j,k,t \quad (۵)$$

$$I_{ikt} = I_{ikt-1} + \sum_{j=1}^{J} Y_{ijkt} - U_{ikt} \qquad \forall i,k,t \quad (۶)$$

$$R_{ikt} = R_{ikt-1} + D_{ikt} - U_{ikt} \qquad \forall i,k,t \quad (۷)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Y_{ijkt} = X_{ijt} \qquad \forall i,j,t \quad (۸)$$

$$\sum_{j=1}^{J} Y_{ijkt} = U_{ikt} \qquad \forall i,k,t \quad (۹)$$

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } X_{ijt} > 0 \\ 0 & \text{if } X_{ijt} = 0 \end{cases} \quad (۱۰)$$

$$X_{ijt} \le M\, Z_{ij} \qquad \forall i,j,t \quad (۱۱)$$

$$X_{ijt}, Y_{ijkt}, U_{ikt}, R_{ikt}, I_{ikt} \ge 0 \qquad \forall i,j,k,t \quad (۱۲)$$

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. معادلهٔ (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 دورهٔ اجرایی را نشان می‌دهد. محدودیت ظرفیت سطح موجودی در هر دوره زمانی بااستفاده ازمعادله (۳) ارائه شده است. معادله (۴) محدودیت زمان تحویل را تضمین می‌کند. محدودیت ظرفیت حمل به مراکز توزیع در دورهای زمانی با استفاده از معادله (۵) بیان شده است. معادله (٦) 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 پس افت 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 مقدارمحصولی 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 این‌صورت صفر می‌باشد. از آنجائی‌که 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 ودر غیر این‌صورت 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 وتوزیع

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 بهینه‌سازیی است که می‌تواند برای حل انواع مختلفی از مسایل بهینه‌سازی تک هدفه روی فضای پیوسته به‌کار گرفته شود. این الگوریتم نسخه توسعه یافته‌ای از الگوریتم ژنتیک (گلدربرگ[۱۹]، ۱۹۸۹) برای بهینه‌سازی سریع‌تر است [۱۷]. نخستین بار مفهوم الگوریتم تکامل تفاضلی روی فضاهای - پیوسته[۲۰] توسط استرن و پرایس[۲۱] در سال ۱۹۹۵ مطرح گردیده‌است. روشی آسان و قوی است که به تعداد کمی متغیرهای کنترلی نیاز دارد و با بررسی‌های زیاد ثابت شده که همگرایی سریع‌تری نسبت به‌دیگر 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 نشان‌دهندهٔ عضو انتخابی iام در جمعیت در تکرار Tام 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، یک‌بار 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 درنهایت 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 ازجواب‌ها به‌صورت تصادفی تولید می‌شوند.

۲. انتخاب سه اندیس از میان جمعیت به‌طور تصادفی

۳. اپراتور جهش به‌صورت زیر اعمال می‌شود:

برای هر بردارهدف $X_{i,T}$، یک بردار تغییرپذیر، $V_{i,T+1}$ بر طبق رابطه (۱٤) تولید می‌شود. $V_{i,T+1}$ نشان‌دهنده جواب جدیدی است که در تکرار T+1ام متناظر با عضو iام جمعیت، توسط عملگر جهش تولید شده‌است.

رابطه (۱۳) بیان می‌کند که i از ۱ 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 هربار چندمین جواب، در لیست مورد نظر می‌باشد:

$$i = 1,2\ldots,N \qquad (۱۳)$$

$$V_{i,T+1} = X_{r_1,T} + F.(X_{r_2,T} - X_{r_3,T}) \qquad (۱۴)$$

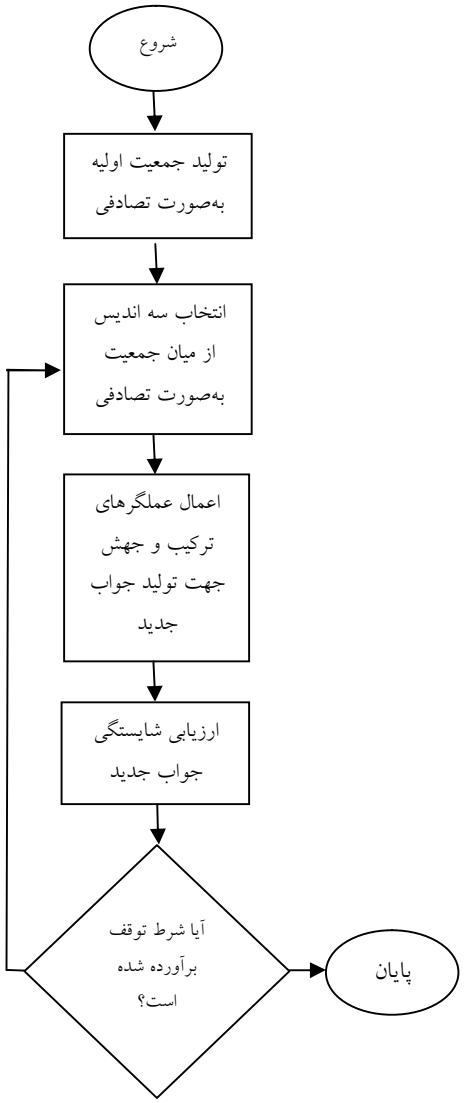
$$r_1, r_2, r_3 \in \{1,2,\ldots,N\} \qquad (۱۵)$$

r_1, r_2, r_3 اندیس‌های تصادفی وصحیح می‌باشند و $F > ۰$ است:

$$F \in [0,1] \qquad (۱۶)$$

F یک ضریب ثابت و حقیقی است تا افزایش اختلاف $\left(X_{r_2,T} - X_{r_3,T}\right)$ را کنترل کند. در واقع جواب‌های جدید را با اضافه کردن اختلاف بین دو بردار از جمعیت به بردار سوم تولید می‌کند. شکل۳ 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:



شکل ۲- ساختار الگوریتم تکامل تفاضلی

برای‌افزایش تنوع[۲۴] در جواب‌ها، ترکیب به‌صورت زیر شرح داده می‌شود. $u_{i,T+1}$ نشان‌دهنده جواب جدیدی است که در تکرار T+1ام متناظر با عضو iام جمعیت، توسط عملگر ترکیب تولید شده‌است:

$$u_{i,T+1} = (u_{1i,T+1}, u_{2i,T+1}, \ldots, u_{Di,T+1}) \qquad (۱۷)$$

$$u_{ji,T+1} = \begin{cases} V_{ji,T+1} & \text{if } rand_j(0,1) \le CR \quad \text{or} \quad j = j_{rand} \\ X_{ji,T} & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (۱۸)$$

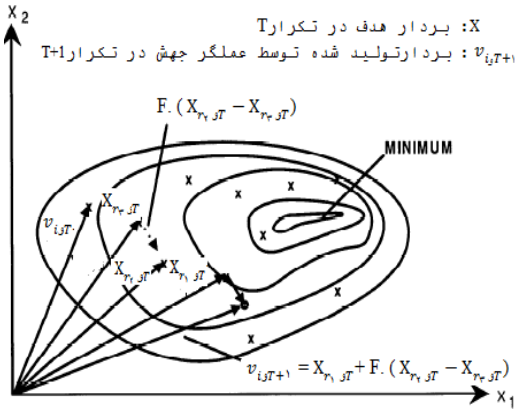
$$J = 1,2,\ldots,D \qquad (۱۹)$$

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 به‌صورت 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 به‌دست آورده‌ایم ترکیب صورت می‌دهیم. شکل۴ یک مثال برای مکانسیم ترکیب برای بردار ۷ بعدی نشان می‌دهد.

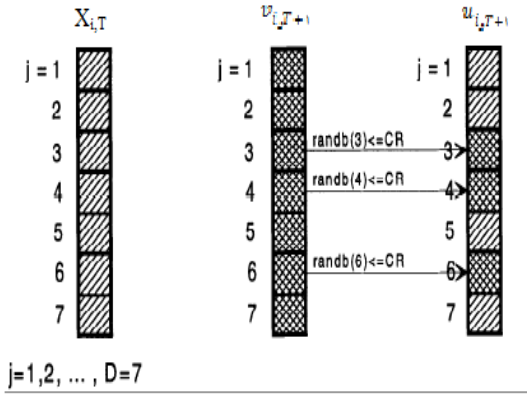
۵. انتخاب جواب (ارزیابی شایستگی جواب)

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 $X_{i,T}$ به‌دست آورد، بردار $u_{i,T+1}$ جایگزین بردار $X_{i,T}$ در نسل بعد می‌شود و در غیر این‌صورت بردار $X_{i,T}$ به نسل بعد می‌رود. مسئله زنجیره تامین دو سطحی تحت مفروضات مورد بررسی در این مقاله، یک مسئلهٔ دو هدفه همراه با محدودیت می‌باشد. درحالی‌که 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 به‌صورت زیر است:

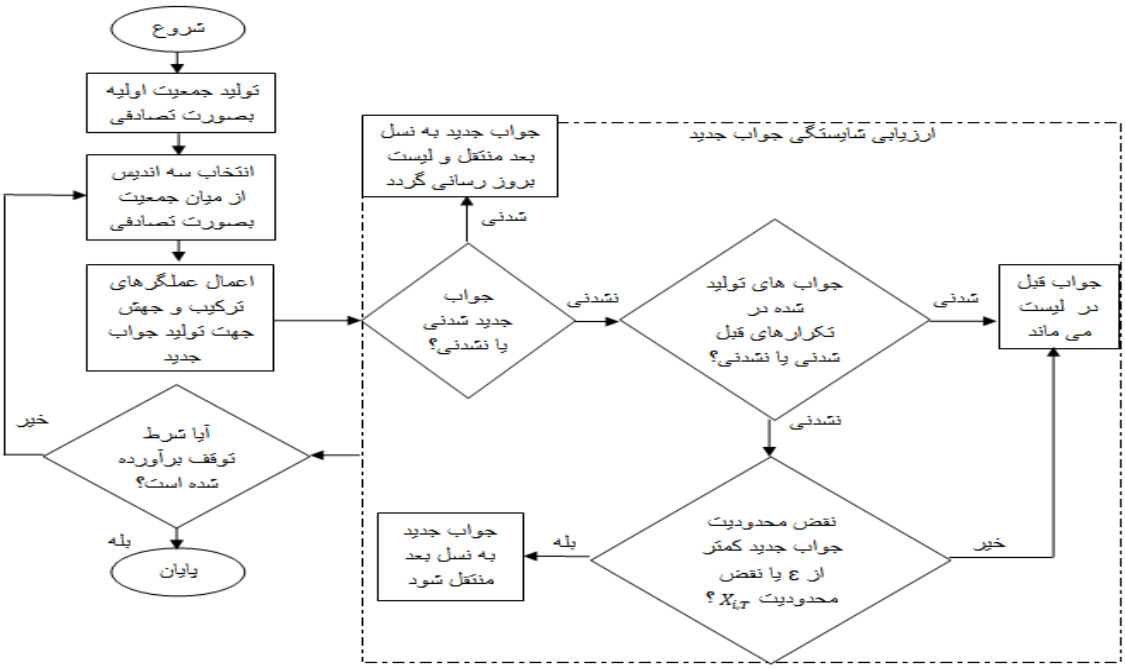
$$\begin{aligned} &\text{Minimize / Maximize} \quad f_i(x) \qquad i = 1,\ldots..,M \\ &\text{Subject to:} \quad \begin{cases} g_j(x) = 0 & j = 1,\ldots.,N \\ h_k(x) \le 0 & k = 1,\ldots.,K \end{cases} \end{aligned} \qquad (۲۰)$$



شکل۳- یک نمونه دوبعدی برای اپراتور جهش



شکل ۴- مثال از فرایند ترکیب برای ۷ بعدی



شکل ۵- ساختار الگوریتم تکامل تفاضلی پیشنهادی

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_{ijt} $Y_{ijkt}, U_{ikt}, R_{ikt}, I_{ikt}$) و متغیر صفر و یک (Z_{ij}) قابل تفکیک هستند و اکثر محدودیت‌ها به حالت تساوی می‌باشد. از آنجایی که دشواری حل مسئلهٔ مذکور ناشی از تساوی بودن اکثر محدودیت‌ها است و در فضای پیوسته، هیچ‌وقت تساوی بین دو متغیر اتفاق نمی‌افتد چون در فضای پیوسته حاصل به‌صورت صفر مطلق نیست؛ بنابراین، محدودیت‌هایی که رابطه تساوی دارند را به‌صورت تفاضل از یک مقدار از پیش تعیین شده مثل اپسیلون[۲۷] تعریف می‌کنیم. این تفاضل با توجه به $h(X) \le 0$ که دررابطه (۲۰) است، باید منفی باشد مثلاً محدودیت $\sum_{k=1}^{k} Y_{ijkt} = X_{ijt}$ به صورت $\sum_{k=1}^{k} Y_{ijkt} - X_{ijt} - \varepsilon < 0$ تعریف می‌کنیم. این نشان‌دهنده این است که حداکثر اختلاف بین $\sum_{k=1}^{k} Y_{ijkt}$ و X_{ijt} بایداز e کمتر باشد تا به جواب برسیم. پس تفاضل محدودیت از e، باید عددی منفی به‌دست آید. اگر حاصل عددی مثبت باشد، میزان تفاوت تفاضل محدودیت از e با صفر را نقض محدودیت گویند. جمع این نقض‌ها را مجموع نشدنی‌ها می‌نامند.

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 به‌دست 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 درنظر 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.

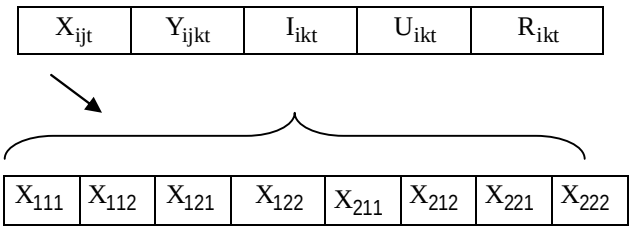
۳-۱ تعریف روش رتبه‌بندی نامغلوب

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 خواهدبود [۱۷].

مراحل الگوریتم پیشنهادی به‌صورت 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



شکل ۶- نمونه‌ای از نحوهٔ 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 به‌طور مثال $i=2$ ، $j=2$ و $t=2$ 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 تولیدشدن 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 این‌صورت مقدار متغیر Z_{ij} صفر می‌باشد. زیرا زمانی‌که مقدار متغیر X_{ijt} مثبت باشد، نشان‌دهنده این است که محصول **i** در کارخانه **j** تولید شده است و در غیر این‌صورت، بدان معنی است که محصول **i** در کارخانه **j** تولید نشده است.

۲. تولید جمعیت اولیه

به‌طورکلی 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

مسئله مورد نظر از نوع کالا هستند و همه آنها به‌جز 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 درنظر و الگوریتم اجرا شد. اعدادی مثل ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۳ در نظر گرفته شد ولی مشاهده شد که با درنظر گرفتن F= ۰/۵ مسئله مورد نظر بهتر و سریع‌تر به‌جواب می‌رسد. بردار $V_{i,T+1}$ از اپراتور جهش به‌صورتی‌که درالگوریتم 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 این‌صورت که CR برابر ۰/۵ فرض می‌شود یعنی با احتمال ۰/۵ بردار $u_{i,T+1}$ مقدار متغیر خود را از بردار $V_{i,T+1}$ می‌گیرد و با احتمال ۰/۵ هم مقدار متغیر خود را از بردار $X_{i,T}$ می‌گیرد. با بررسی‌های متعدد این نتیجه حاصل شد که با احتمال ۰/۵ سرعت همگرایی به‌جواب سریع‌تر و بهترمی‌شود. 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+1ام متناظر با عضو iام 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 iام هستند)، را نگه داشته و بقیه را حذف می‌کنیم. با این کار لیست S_i به‌روزرسانی می‌شود. چون به‌جواب شدنی رسیده‌ایم، جواب حاضر($u_{i,T+1}$) را به یک لیست دیگر، که مجموعهٔ جواب‌های شدنی نامغلوب (ND) را در بردارد 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

مثل اپسیلون کمتر باشد، به دلیل کوچکی تفاوت، از آن چشم پوشی می‌کنیم و $u_{i,T+1}$ را در لیست S_i قرارمی‌دهیم تا این فاصله و شکاف هربار کمتر شود و بتوانیم از این شکاف خارج شویم. در غیر این‌صورت اگر جمع مقادیر نشدنی‌های $u_{i,T+1}$ کمتر از جمع مقادیر نشدنی‌های جواب $X_{i,T}$ 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 این‌صورت از $u_{i,T+1}$ به‌دست آمده، صرف‌نظر کرده و به یافتن جواب جدید مربوط به عضو i+1ام جمعیت می‌پردازیم.

۳. اگر جواب جدید($u_{i,T+1}$) شدنی باشد و قبل از تکرارT نیز به جواب شدنی طی تکرارهای ۱تاT متناظر باعضو iام 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، به‌روز رسانی می‌کنیم.

۴. اگر جواب جدید($u_{i,T+1}$) نشدنی باشد و قبل از تکرار T نیز به جواب شدنی طی تکرارهای ۱ تا T متناظر با عضو iام جمعیت رسیده باشیم، از $u_{i,T+1}$ صرف‌نظر می‌کنیم (چون این جواب نشدنی است و قبلاً به‌جواب شدنی رسیده‌ایم)، سپس به یافتن جواب جدید مربوط به عضوi+1 ام جمعیت می‌پردازیم.

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

۵. انتخاب جواب

در پایان هر تکرار، لیست ND را با استفاده از روش رتبه‌بندی نامغلوب به‌روز 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 نامغلوب، در پایان تکرار آخر خواهد بود. پس در پایان از بین جواب‌های شدنی، لبه نامغلوب را تشکیل می‌دهیم. اینها جواب‌های شدنی هستند که هیچ‌کدام بر دیگری غالب نیستند و جواب‌های نهایی و بهینه ما را تشکیل می‌دهند.

۴- نتایج محاسباتی

با استفاده از مسائل نمونهٔ تصادفی متعدد، عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای مسائل با ابعاد کوچک در مقایسه با نرم‌افزار LINGO که به‌صورت قطعی به حل مسائل می‌پردازد، ارزیابی می‌شود. ماهیت الگوریتم حل مسئله، رسیدن به بهترین جواب در یک زمان قابل قبول می‌باشد. از اینروی، 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 نرم‌افزارLINGO 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 و۴ 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 ٤ ارائه شده است. در این مقاله، برای هر یک از پارامترهای مسئله مقادیر تصادفی با توزیع یکنواخت

جدول۳- روش تولید مسائل تصادفی

شماره مسئله کوچک	بعد مسئله $(i \times j \times k \times t)$	شماره مسئله متوسط	بعد مسئله $(i \times j \times k \times t)$	شماره مسئله بزرگ	بعد مسئله $(i \times j \times k \times t)$
۱	۲×۲×۲×۲	۵	۲×٤×۲×۲	۹	۳×۳×۳×۳
۲	۲×۲×۳×۲	۶	۲×۲×۳×۳	۱۰	٤×۳×٤×۳
۳	۲×۲×۲×۳	۷	۲×۲×۲×٤	۱۱	۳×۳×٤×٤
۴	۳×۲×۲×۲	۸	۲×۳×۲×۳	۱۲	۳×٤×۳×٤

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_{ijt} , Ct_{ijkt} , p_{it} , $c\upsilon_{ij}$, ST_{ijk} PT_{ij} , D_{ikt} , $cs_{iv}f_{ijt}$, co_{ikt} , ch_{ikt}	U[1,10]	DT_{ikt}	U[100,200]

جدول۵- میانگین مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی حل مسائل نمونه تصادفی با ابعادکوچک

شماره مسئله	LINGO			MODE		
	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	زمان (ثانیه)	میانگین تابع هدف اول	میانگین تابع هدف دوم	زمان (ثانیه)
۱	۰	۱۱۴/۳۸	۴	-۳۰۴/۶۹	۶۶/۱۰	۱۰
۲	۰	۷۳۲/۹۰	۵	-۵۳۶/۳۰	۲۵۳/۹۳	۱۳/۰۶
۳	۰	۳۳۹/۲۹	۹	-۵۳۱/۸۸	۱۱۲/۶۱	۱۲/۶۸
۴	۰	۲۶۱/۸۸	۱۲	-۴۹۷/۳۴	۲۰۲/۴۶	۱۴/۴۰

بین ۱ تا ۱۰ تعیین شده، به‌جز برای پارامتر ظرفیت حمل و ظرفیت نگهداری که مقادیر را به‌صورت توزیع یکنواخت [۱،۱۰] +۱۰ درنظر گرفته و نیز برای پارامتر زمان تحویل توزیع یکنواخت [۱۰۰،۲۰۰] و هم‌چنین برای پارامتر سطح کیفیت اولیه توزیع یکنواخت [۱،۱-] مدنظر قرار گرفته شده است.

همان‌طور که توضیح داده شد الگوریتم مقدار پارامترها را به‌صورت تصادفی تولید می‌کند. برای اینکه جواب الگوریتم پیشنهادی با نرم‌افزار 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 لینگو، به‌عنوان داده وارد نمودیم.

۴-۲ 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 به‌ترتیب برابر با ۸۰ و ۵۰۰ و برای مسائل نمونه بزرگ به‌ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۹۰۰ قرار داده شده است. سایر پارامترها همانند CR وآستانه و ε و F برای تمام مسائل

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

شماره مسئله	LINGO			MODE		
	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	زمان (ثانیه)	میانگین تابع هدف اول	میانگین تابع هدف دوم	زمان (ثانیه)
۵	۰	۳۰۴/۶	۷۰	-۵۶۳/۰۹	۲۵۸/۵۰	۵۴/۸۵
۶	۰	۲۸۱/۱۶	۹۷	-۶۴۹/۴۲	۴۱۳/۹۱	۵۸/۹۵
۷	۰	۲۱۹/۴۱	۱۲۵	-۶۰۸/۷۱	۳۳۶/۵۸	۹۶/۱۷
۸	۰	۳۱۳/۷۸	۲۴۳	-۷۲۷/۵۸	۲۹۱/۸۴	۱۰۷/۱۴

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

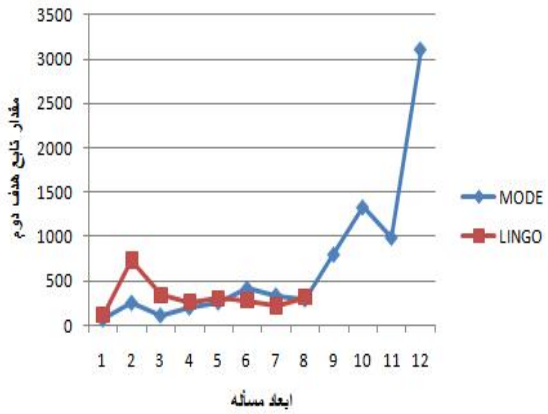
شماره مسئله	LINGO			MODE		
	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	زمان (ثانیه)	میانگین تابع هدف اول	میانگین تابع هدف دوم	زمان (ثانیه)
۹	-	-	>۷۲۰۰	-۹۷۱/۸۴	۷۹۷/۴۵	۶۸۰/۷۱
۱۰	-	-	-	-۱۸۷۸/۵۶	۱۳۲۹/۹۲	۶۲۰/۶۳
۱۱	-	-	-	-۲۰۳۶/۰۶	۹۸۸/۴۱	۸۶۹/۹۴
۱۲	-	-	-	-۲۴۱۴/۴۳	۳۱۰۹/۳۹	۵۸۳/۰۸

به‌ترتیب ۰/۵، ۰/۱، ۱ و ۰/۵ درنظر 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 درنظر گرفته شود.

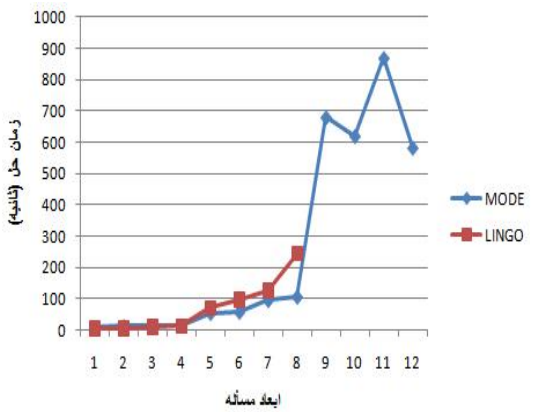
۴-۳ نتایج عددی

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 و۶ و۷ نمایش داده شده‌اند. دراین 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 هر مسئله می‌یابد.

شکل ٦ 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 شکل۷ 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 هربار که تابع اول را برای LINGO درنظر می‌گیریم، متوسط همان تابع اول را برای الگوریتم



شکل۶- مقایسه تابع هدف دوم جواب‌های به‌دست آمده از MODE و LINGO



شکل ۷- مقایسه زمان حل MODE و LINGO

پیشنهادی درنظر می‌گیریم و به‌همین ترتیب برای تابع هدف دوم:

$$\%\ \text{error} = \frac{\text{مقدار تابع هدف MODE} - \text{مقدار تابع هدف LINGO}}{\text{مقدار تابع هدف LINGO}} \times 100 \quad (۲۱)$$

در جدول ۸ برای مسئله شماره ۱ (حالت ۲*۲*۲*۲) با جمعیت اولیه ۳۰، تعداد تکرارهای مختلف درنظر گرفته شده است. همان‌طورکه شکل ۸ و۹ 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 به‌دست آمده از الگوریتم پیشنهادی و حل بهینه (LINGO) را فقط برای تابع دوم محاسبه نمودیم.

۵- نتیجه‌گیری

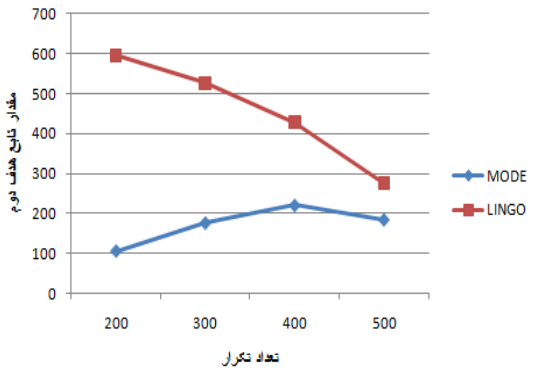
این مقاله به بررسی مسئله زنجیره تامین شامل دو سطح تولید و توزیع در حالت چند دوره‌ای چند محصولی و با اهداف بیشینه‌سازی سود زنجیره و کیفیت محصولات پرداخته است. یک مدل ریاضی با متغیرهای صحیح و پیوسته برای تولید محصول در چندین کارخانه و ارسال آن به چندین مرکز توزیع طراحی شده است. مراکز توزیع برحسب ظرفیت و هزینه نگهداری با هم تفاوت دارند. تمام محصولات در هر دوره زمانی به مراکز توزیع حمل می‌شوند. هم‌چنین فرض شده‌است تقاضا قطعی و از نوع پس افت 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 به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های کلاسیک به‌کار برده می‌شوند. در واقع الگوریتم‌های هیوریستیکی برای یافتن تعادلی بین یافتن حل بهینه و زمان حل، به‌وجود آمده‌اند و هدف اصلی آنها یافتن حل بهینه یا تقریباً بهینه در زمان قابل قبول است. از اینرو، برای حل مدل پیشنهادی، الگوریتم تکامل تفاضلی توسعه داده شده است. کارایی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از مسایل نمونه متعددی که به‌صورت تصادفی ایجاد شده‌اند با نرم‌افزار LINGO مقایسه شده‌است. نتایج عددی بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی است.

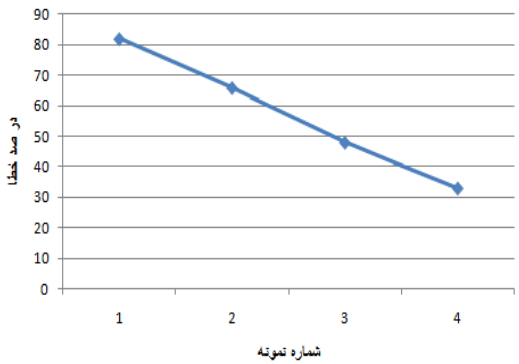
به‌عنوان تحقیقات آتی می‌توان تقاضای محصول را احتمالی

جدول ۸- مقایسه مقدارتابع هدف دوم در تکرارهای مختلف

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



شکل ۸- مقایسه MODE و LINGO در تکرارهای مختلف



شکل۹- خطای الگوریتم پیشنهادی

درنظر 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 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.

واژه نامه

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

مراجع

1. Hand Field, R.B., and Nichols, R.,"Introduction to Supply Chain Management", New Jersey, Prentice Hall, pp.1-3, 1999.
2. 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.
3. 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 Sunder 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 ع.، "طراحی مدل ریاضی برنامه‌ریـزی تولیـد و توزیـع شرکت آزمایش "، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، 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.