

## حل یک مدل ریاضی جدید برای زمانبندی در شبکه‌های توزیع با بهینه‌سازی ذرات انبوه چند هدفه

رحمت عرب<sup>۱</sup>، رضا توکلی مقدم<sup>۲\*</sup>، محسن فرقانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه یزد.

### چکیده

در این مقاله، یک مدل ریاضی جدید دو هدفه و آمیخته با اعداد صحیح برای مسایل شبکه‌های توزیع ارائه می‌شود. یک تابع هدف هزینه‌های خرید، حمل و نقل و نگهداری کالاها را حداقل می‌کند و تابع هدف دیگر با عنوان توزیع بهنگام، مجموع مقادیر دیرکرد یا زودکرد تحویل کالاها را با توجه به اختلاف زمان تحویل و زمان مقرر کمینه می‌کند. این مدل برای شبکه توزیع سه سطحی شامل تأمین‌کنندگان، عمده‌فروشان و خرده‌فروشان طراحی می‌شود که چندین محصول با مقادیر تقاضای قطعی را در یک افق چند دوره‌ای از طریق دو کانال مستقیم و غیر مستقیم توزیع می‌کند. از آنجا که مدل دو هدفه ارائه شده در ابعاد واقعی از نظر زمانی قابل حل با روش‌های دقیق نیست، یک الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه چند هدفه برای حل مسأله طراحی می‌شود که کیفیت آن در مسایل کوچکتر که از روش‌های دقیق نیز قابل حل هستند، با جواب‌های حاصل از یک نرم افزار بهینه‌ساز مقایسه می‌شود. در ادامه مقاله، نشان داده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی در زمان کوتاهی نسبت به روش دقیق مربوط به نرم افزار لینگو به جواب‌های خوبی از لحاظ کیفیت دست می‌یابد و در ابعاد بزرگ نیز در مدت زمان قابل قبولی به جواب می‌رسد.

**واژه‌های کلیدی:** مدیریت زنجیره تأمین، شبکه‌های توزیع، بهینه‌سازی چند هدفه، بهینه‌سازی ذرات انبوه.

## ۱- مقدمه

## ۱-۱- بیان مسأله

مدیریت زنجیره تأمین از فلسفه‌هایی است که در چند دهه اخیر به علت افزایش روزافزون رقابت‌پذیری و تلاش سازمان‌ها برای بقا و با تکیه بر پیشرفت‌های حاصل در تکنولوژی اطلاعات و نزدیک شدن ارتباطات مورد توجه سازمان‌ها قرار گرفته است. رمز بقای سازمان‌ها در ارضای نیازهای مشتریان است و نگرش مدیریت زنجیره تأمین<sup>۱</sup> (SCM) نه فقط موجودیت نهایی در ارتباط با مشتری که محصول نهایی را تحویل می‌دهد، بلکه یک توالی از تأمین‌کنندگان را در این راستا مؤثر می‌داند و "یکپارچه‌سازی"<sup>۲</sup> سازمان‌های درگیر و "هماهنگ‌سازی"<sup>۳</sup> جریان‌های مواد، اطلاعات و مالی را برای بهبود رقابت‌پذیری زنجیره تأمین بررسی می‌کند. در بحث مدیریت زنجیره تأمین در سال‌های اخیر، توزیع کالا به مشتریان از طریق شبکه‌های توزیع مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. در هنگام تکمیل سفارش‌های کالاها دو فاکتور اساسی، هزینه و تحویل هستند.

یکی از بحث‌های مطرح در زمینه توزیع کارآمد کالاها، تحویل بموقع در شبکه‌های توزیع است. از یک طرف، از آنجا که هزینه‌های لجستیکی بخش عمده‌ای از هزینه‌های یک زنجیره تأمین را تشکیل می‌دهند، هماهنگ‌سازی برنامه‌ریزی توزیع و حمل و نقل و کنترل موجودی‌ها به‌عنوان فرآیندهای اصلی لجستیکی در این راستا می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی را در کل هزینه‌های زنجیره تأمین موجب شود؛ و از طرف دیگر، نقش بسزایی در تعیین سطح خدمت مشتری خواهد داشت.

این مسأله، تصمیمات توزیع را در یک زنجیره تأمین سه سطحی در افق برنامه‌ریزی [1, T] بررسی می‌کند.

زنجیره تأمین با چند عمده فروش و چند خرده فروش خواهیم داشت که چندین قلم کالای مورد نیاز مشتریان را تأمین می‌کنند. کالاها از چند تأمین‌کننده خارجی تأمین می‌شود و توسط دو کانال حمل مستقیم (ارسال مستقیم از تأمین‌کنندگان به خرده‌فروشان) و غیر مستقیم (ارسال از تأمین‌کنندگان به عمده‌فروشان و سپس به خرده‌فروشان) توزیع می‌شود. در ضمن، هر تأمین‌کننده می‌تواند بیش از یک نوع قلم را تأمین کند. تقاضای کالاها در محل خرده‌فروشی‌ها قطعی و پویا است. مدت زمان تحویل کالاها توسط تأمین‌کنندگان به خرده‌فروشان یا انبارهای عمده‌فروشان پس از دریافت سفارش از آنها به صورت قطعی، پویا و مضرب صحیحی از طول یک دوره است. خرده‌فروشان می‌توانند هر کالا را از چندین انبار تهیه کنند یا به چندین تأمین‌کننده سفارش بدهند. انبارهای عمده‌فروشی نیز می‌توانند هر کالا را به چندین تأمین‌کننده سفارش بدهند. به همین ترتیب عناصر هر رده می‌توانند به چندین عنصر رده پایین‌تر خود سرویس بدهند. بعلاوه، خروج کالاها از انبارها براساس قاعده اولین ورود-اولین خروج انجام می‌شود. این مقاله در قالب مقاله علمی-پژوهشی ارائه شده است.

## ۱-۲- اهداف تحقیق

اهداف این تحقیق را می‌توان به شرح ذیل خلاصه نمود:

الف) طراحی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه برای مسأله حداقل سازی هزینه‌ها و زمانبندی آنها؛ به گونه‌ای که اهداف مطلوب حاصل گردند. بنابراین هدف از طرح این مسأله این است که چه مقدار از هر یک از کالاها باید در هر دوره از هر مبدأ

را در دو مسیر خرید و عرضه از دید خریداران، و حمل و نقل و لجستیک از دید خرده فروشان / عمده فروشان تقسیم‌بندی می‌کند.

کو و همکاران<sup>۸</sup> (۱۹۹۹) شبکه توزیعی شامل یک انبار مرکزی و تعدادی تأمین‌کننده را کرده‌اند. میزان تقاضای انبار غیر قطعی است و از یک سیاست تغییر یافته از مرور دوره‌ای برای کنترل موجودی‌ها استفاده می‌شود. کورپلا و لووسمرا<sup>۹</sup> (۱۹۹۹) برای طراحی بهینه شبکه انبارها، ابتدا با استفاده از روش فرایند تحلیلی سلسله مراتبی<sup>۱۰</sup> (AHP) انبارها را بر اساس سطح خدمت مورد نیاز مشتریان رتبه‌بندی کرده‌اند. سپس مدل ریاضی طراحی کرده‌اند که در آن مقادیر قطعی تقاضا به‌عنوان ورودی هستند و محدودیت‌هایی چون حداقل موجودی مجاز برای انبارهای باز و تعداد انبارها وجود دارد. صبری و بیمون<sup>۱۱</sup> (۲۰۰۰) به بررسی شبکه زنجیره تأمین شامل تأمین‌کنندگان، کارخانجات، مراکز توزیع و نواحی تقاضا پرداخته‌اند. در سطح استراتژیک ساختار بهینه شبکه تعیین می‌شود. مسأله چند محصوله، با تقاضای غیر قطعی و شامل چند ماده اولیه است. چان و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۰۵) مسأله‌ای را برای پیدا کردن تورهای جدا از هم برای وسایل نقلیه برای توزیع کالا از انبارها به نقاط تقاضا با مقادیر احتمالی طراحی کرده‌اند. پیرکول و جایرمن<sup>۱۳</sup> (۲۰۰۱) زنجیره تأمین شامل تأمین‌کنندگان، کارخانجات، مراکز توزیع و نواحی تقاضا را با چند محصول با تقاضای قطعی بررسی می‌کنند و مدلی برای تصمیم‌گیری همزمان در دو سطح استراتژیک و عملیاتی برای راه‌اندازی تسهیلات، تعیین میزان تولید، تخصیص مراکز توزیع به نواحی تقاضا و میزان حمل ارائه داده‌اند.

به هر مقصد حمل شود تا با توجه به محدودیت‌های مسأله توابع هدف کمینه شوند.

ب) تایید روش طراحی فوق از طریق حل مسأله با استفاده از روش ریاضی و طراحی روند مناسب برای به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه چندهدفه برای کاربرد در مسایل دنیای واقعی.

### ۱-۳- مرور ادبیات موضوع

فلسفه مدیریت زنجیره تأمین از اوایل دهه ۱۹۸۰ مورد توجه قرار گرفت و مقالات و تحقیقات موجود به سال‌های ۱۹۹۰ و پس از آن بر می‌گردد. در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ بیشتر تولیدکنندگان برای کاهش هزینه تولید هر واحد محصول بیشتر روی تولید انبوه به‌عنوان استراتژی عملیاتی اولیه تکیه می‌کردند و به انعطاف‌پذیری محصول و فرآیند توجهی نداشتند. پیشرفت‌ها در زمینه محصول بسیار کند انجام می‌شد و منحصراً به تکنولوژی فردی خود سازمان و ظرفیت آن متکی بود. در دهه ۱۹۷۰ برنامه‌ریزی منابع تولید<sup>۴</sup> (MRP) مطرح شد و مدیران به مفاهیم جدیدی در مدیریت مواد برای بهبود عملکرد سازمان متوسل شدند. رقابت جهانی در دهه ۱۹۸۰ باعث شد تا سازمان‌های بزرگ قیمت‌ها (هزینه‌ها) را پایین بیاورند، کیفیت را بالا برده، محصولات مطمئن را با انعطاف‌پذیری در طراحی ایجاد کنند. استفاده از فلسفه تولید بهنگام نیز برای بهبود کارایی تولید و زمان تولید متداول شد. در دهه ۱۹۹۰ با گسترش مدیریت مواد در بحث زنجیره ارزش<sup>۶</sup>، تولید کنندگان فقط از تعداد معدودی تأمین‌کننده معتبر و تأیید شده کالای مورد نیاز خود را تأمین می‌کردند و این کار موجب افزایش کارایی در زنجیره ارزش شده است. تن<sup>۷</sup> (۲۰۰۱) تکامل SCM

مباحث توضیحاتی کوتاه آورده شده است.

الف) مقالات مطالعه شده را می‌توان از لحاظ پرداختن به سطوح برنامه‌ریزی در دو سطح استراتژیک و عملیاتی قرار داد.

ب) از نظر ماهیت مقادیر تقاضا، مقالات ارایه شده را می‌توان به دو دسته قطعی و غیر قطعی طبقه‌بندی کرد که بیشتر آنها مقادیر قطعی تقاضا را بررسی کرده‌اند و تعداد کمتری به مقادیر غیر قطعی و احتمالی پرداخته‌اند.

ج) از نظر محدودیت‌ها باید گفت از جمله محدودیت‌های عمده به کار رفته در مدل‌سازی مسایل توزیع در زنجیره تأمین، محدودیت ظرفیت و سطح خدمت انبارهاست.

د) توابع هدف زیر به صورت تکی یا چندگانه در مدل‌سازی‌ها استفاده شده‌اند. به طوریکه حداقل هزینه بسیار مورد توجه بوده است. برقراری تعادل بین رده‌ها در موارد کمی مورد توجه بوده است.

ه) رده‌های مورد توجه شامل تدارک، تولید و توزیع هستند. در اغلب موارد به دو تا از این سه رده توجه شده است؛ ضمناً تدارک کمتر مورد توجه قرار گرفته و بیشتر تولید - توزیع تحت مطالعه بوده است.

و) بیشتر کارهای انجام شده روی یک محصول بوده است تا چند محصول.

ز) تعداد تحقیقات در حالت تک دوره‌ای بیشتر است؛ لیکن به نظر می‌رسد روند حرکت به سوی بیشتر منظور نمودن چند دوره است.

ح) در زمینه ارایه مدل ظاهراً بیان این مسایل در درجه اول به عنوان یک مدل ریاضی همیشه مورد توجه بوده است. این مدل‌ها اغلب به صورت خطی

دسکی و ورتتر<sup>۱۴</sup> (۲۰۰۱) به مقوله راه‌اندازی تعدادی تسهیلات جید در یک فضا می‌پردازند؛ به‌گونه‌ای که هر یک از تسهیلات به یک محدوده تقاضا سرویس بدهد. نوزیک<sup>۱۵</sup> (۲۰۰۱) مکان‌یابی تسهیلات را در بین نقاط تقاضا با مقادیر قطعی بررسی کرده است. وانگ<sup>۱۶</sup> (۲۰۰۳) با در نظر گرفتن سطوح خدمت مورد نیاز، به طراحی یک سیستم لجستیکی شامل تعدادی مراکز تولید، انبارها یا مراکز توزیع و مشتریان با مقادیر تقاضای غیر قطعی می‌پردازد. ساریف و همکاران<sup>۱۷</sup> (۲۰۰۲) شبکه زنجیره تأمین شامل تأمین‌کنندگان، کارخانجات و مراکز توزیع را بررسی کرده‌اند. تصمیماتی که باید در این شبکه اتخاذ شوند، شامل راه‌اندازی کارخانجات و مراکز توزیع، میزان تولید و حمل محصولات است.

ژو و همکاران<sup>۱۸</sup> (۲۰۰۲) شبکه زنجیره تأمین را طراحی کرده‌اند که هزینه حمل و نقل و سطح خدمت را به بهترین وجه متعادل کند، به گونه‌ای که تا حد امکان به همه مراکز توزیع بار کاری یکسان داده شود و کل مسافت حمل شبکه کمینه شود. سیام<sup>۱۹</sup> (۲۰۰۲) مدل زنجیره تأمین شامل کارخانجات و انبارها با مقادیر تقاضای قطعی مشتریان از چند محصول را ارائه داده است. میراندا و گاریدو<sup>۲۰</sup> (۲۰۰۴) تصمیمات کنترل موجودی مثل اندازه سفارش اقتصادی، نقطه سفارش و موجودی اطمینان را همزمان با مکان‌یابی تسهیلات در طراحی شبکه توزیع اتخاذ کرده‌اند.

#### ۱-۴- مروری بر مقالات

در این بخش، یک دسته‌بندی مقالات مورد بررسی به صورت خلاصه در جدول (۱) ارایه می‌گردد. باید اشاره کرد که در مورد اهداف، خروجی‌ها، محدودیت‌ها و مفروضات مدل‌های مربوطه در ادامه

سازي استفاده می‌شود. در حل این مسایل اغلب از روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری برای حل استفاده شده است.

ولی با متغیرهای مختلط هستند.

ط) اغلب این مدل‌های دارای اندازه‌های بزرگ و غیرقابل حل به صورت بهینه خواهند بود. به همین دلیل، از نگرش سلسه مراتبی برای حل و گاه در مدل

جدول ۱: دسته‌بندی مقالات

تعریف مسأله و فرضیات			محدودیت‌ها			خروجی‌ها			اهداف																						
سطوح برنامه‌ریزی	استراتژیک	عملیاتی	محدودیت ظرفیت تسهیلات	تأمین کامل تقاضا	زمان/فاصله مجاز تحویل به مشتری	تعداد تسهیلات مجاز به راه اندازی	مکان پایی تسهیلات	تخصیص تسهیلات	میزان حمل مواد اولیه و محصولات بین تسهیلات	مسیر پایی	مدل حمل	کاتال توزیع	مینیم هزینه یا ماکزیم سود	تبادل بین رده ها	ماکزیم سطح خدمت مشتری	ماکزیم Robustness تصمیمات															
محصول	چند محصولی	تک محصولی	چند دورهای	تک دورهای	چند ماده اولیه	تک ماده اولیه	مورر دورهای	مورر دائم	تعداد تسهیلات	میزان تولید	مدل حمل	کاتال توزیع	مینیم هزینه یا ماکزیم سود	تبادل بین رده ها	ماکزیم سطح خدمت مشتری	ماکزیم Robustness تصمیمات															
رده‌های زنجیره	تأمین	تولید	توزیع	قطعی	غیرقطعی	چند دورهای	تک دورهای	چند ماده اولیه	تک ماده اولیه	مورر دورهای	مورر دائم	تعداد تسهیلات	میزان تولید	مدل حمل	کاتال توزیع	مینیم هزینه یا ماکزیم سود	تبادل بین رده ها	ماکزیم سطح خدمت مشتری	ماکزیم Robustness تصمیمات												
تقاضا	تأمین	تولید	توزیع	قطعی	غیرقطعی	چند دورهای	تک دورهای	چند ماده اولیه	تک ماده اولیه	مورر دورهای	مورر دائم	تعداد تسهیلات	میزان تولید	مدل حمل	کاتال توزیع	مینیم هزینه یا ماکزیم سود	تبادل بین رده ها	ماکزیم سطح خدمت مشتری	ماکزیم Robustness تصمیمات												
دوره‌ها	تأمین	تولید	توزیع	قطعی	غیرقطعی	چند دورهای	تک دورهای	چند ماده اولیه	تک ماده اولیه	مورر دورهای	مورر دائم	تعداد تسهیلات	میزان تولید	مدل حمل	کاتال توزیع	مینیم هزینه یا ماکزیم سود	تبادل بین رده ها	ماکزیم سطح خدمت مشتری	ماکزیم Robustness تصمیمات												
مواد اولیه	تأمین	تولید	توزیع	قطعی	غیرقطعی	چند دورهای	تک دورهای	چند ماده اولیه	تک ماده اولیه	مورر دورهای	مورر دائم	تعداد تسهیلات	میزان تولید	مدل حمل	کاتال توزیع	مینیم هزینه یا ماکزیم سود	تبادل بین رده ها	ماکزیم سطح خدمت مشتری	ماکزیم Robustness تصمیمات												
سیستم سفارش دهی	تأمین	تولید	توزیع	قطعی	غیرقطعی	چند دورهای	تک دورهای	چند ماده اولیه	تک ماده اولیه	مورر دورهای	مورر دائم	تعداد تسهیلات	میزان تولید	مدل حمل	کاتال توزیع	مینیم هزینه یا ماکزیم سود	تبادل بین رده ها	ماکزیم سطح خدمت مشتری	ماکزیم Robustness تصمیمات												
St	O	MP	SP	SS	Su	P	Dis	D	S	MP	SP	MR	SR	PR	CR	Ca	CS	Co	FSL	N	L	FA	PQ	DQ	R	TM	DCh	C	B	CSL	R0

هر محصول در هر دوره در انبار کارخانجات و تابع هدف، کمینه کردن هزینه‌ها است. این مدل به یک مدل برنامه‌ریزی خطی تبدیل شده است که با روش سیمپلکس قابل حل خواهد بود. ایده اولیه ایجاد مدلی که در این مقاله ارائه شده بر مبنای مدل وانگ بوده است. شباهت این مدل با مدل ارائه شده، توسط وانگ در ایده تحویل به موقع است. تفاوت‌های عمده این دو مدل را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

الف) در مدل وانگ و همکاران (۲۰۰۳) تنها حداقل کردن هزینه‌ها مورد توجه بوده است، در صورتیکه در این مدل بحث هزینه‌ها و تحویل بموقع به‌عنوان دو مقوله متفاوت مد نظر قرار گرفته است.

## ۲- مدل ریاضی و روش تحقیق

وانگ و همکاران (۲۰۰۳) شبکه توزیعی متشکل از انبارها و خرده فروشان را در نظر گرفته‌اند. در این شبکه کالاها قبل از رسیدن به دست مشتری نهایی به طور موقت در انبارها ذخیره می‌شوند. هر انبار می‌تواند بسته به نیاز خرده فروشان به چند خرده فروش سرویس بدهد. سیستمی که بتواند با فرض محدودیت ظرفیت انبارها در تأمین هر کالا در هر دوره، تقاضای مورد نیاز مشتری را به موقع تأمین کند، بسیاراهمیت خواهد داشت. در صورتی که تأمین نیاز زودتر یا دیرتر از زمان مقرر انجام گیرد هزینه‌هایی را متناسب با قیمت محصول تأمین شده از هر انبار (قیمت تولید در کارخانه) در بر خواهد داشت. خروجی مدل طراحی شده، مقدار موجودی

$Y_{pijt}$ : مقدار کالای  $p$  که در ابتدای دوره  $t$  از تأمین کننده  $i$  به عمده فروش  $j$  حمل می شود.

$u_{pkjt}$ : مقدار کالای  $p$  که در ابتدای دوره  $t$  از عمده فروش  $j$  به خرده فروش  $k$  حمل می شود.

$v_{pikt}$ : مقدار کالای  $p$  که در ابتدای دوره  $t$  از تأمین کننده  $i$  به خرده فروش  $k$  حمل می شود.

$B_{pkt}$ : مقدار کمبود خرده فروش  $k$  از کالای  $p$  در دوره  $t$ .

$In_{pkt}$ : مقدار اضافی تحویل داده شده از کالای  $p$  به خرده فروش  $k$  در دوره  $t$ .

$v'_{pkt}$ : متغیر صفر و یک نشان دهنده وجود کمبود یا اضافی در مقدار تحویل داده شده از کالای  $p$  به خرده فروش  $k$  در دوره  $t$ .

پارامترهای مدل نیز شامل موارد زیر است:

$a_{ijp}$ : مدت زمان تحویل کالای  $p$  از تأمین کننده  $i$  به عمده فروش  $j$ .

$f_{ikp}$ : مدت زمان تحویل کالای  $p$  از تأمین کننده  $i$  به خرده فروش  $k$ .

$S_{pit}$ : ظرفیت تولید کالای  $p$  توسط تأمین کننده  $i$  در دوره  $t$ .

$d_{pkt}$ : میزان تقاضای کالای  $p$  در خرده فروشی  $k$  در ابتدای دوره  $t$ .

$c_p$ : هزینه حمل واحد کالای  $p$  به ازای واحد مسافت.

$cu_{pi}$ : قیمت خرید هر واحد کالای  $p$  از تأمین کننده  $i$ .

$bl_{pkt}$ : حداکثر میزان کمبود مجاز کالای  $p$  در انبار خرده فروش  $k$  در دوره  $t$ .

$m_{ij}$ : مسافت بین تأمین کننده  $i$  و عمده فروش  $j$ .

$n_{ik}$ : مسافت بین تأمین کننده  $i$  و خرده فروش  $k$ .

$o_{jk}$ : مسافت بین عمده فروش  $j$  و خرده فروش  $k$ .

ب) مدل وانگ و همکاران (۲۰۰۳) مربوط به یک زنجیره یک رده ای است، ولی این مدل به صورت زنجیره تأمین مخلوط دو رده و سه رده ای با دو کانال توزیع است.

شایان ذکر است که روش تحقیق به صورت توسعه الگوریتمی بوده و برای جمع آوری داده ها از اندازه ها و داده های مسائل حل شده توسط دیگران از جمله وانگ استفاده شده است.

## ۲-۱- ویژگی های مدل

مدل مربوط ویژگی های خاصی دارد که از جمله می توان به دو هدفه بودن آن اشاره کرد. بحث حل مسائل چند هدفه از مباحث به روز و البته، دشوار ریاضی است که در اکثر موارد به بررسی زیاد و استفاده از روش های غیر ریاضی مانند الگوریتم های فراابتکاری نیاز دارد که این موضوع به علت ساختار مسأله و افزایش زمان حل آن است. همچنین، در این مدل محدودیت های زیادی مورد توجه قرار گرفته است که همگی سعی بر این دارند که کالاها در بهترین زمان انتقال داده شوند و در عین حال، حداقل کردن هزینه ها نیز مورد توجه قرار بگیرد.

## ۲-۲- اندیس ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل

در اینجا، ابتدا مدل ریاضی پیشنهادی و سپس توضیحی در مورد مشخصات آن ارائه می شود. این مدل دارای پنج اندیس تأمین کنندگان ( $i$ )، عمده فروشان ( $j$ )، خرده فروشان ( $k$ )، دوره ها ( $t$ ) و کالاها ( $p$ ) است.

متغیرهای مدل شامل موارد زیر است:

$$\sum_i \sum_{\tau=1}^t y_{pij\tau} \geq \sum_k \sum_{\tau=1}^t u_{pkjt} ; \forall p, j, t \neq T \quad (6-3)$$

$h_{pj}$ : هزینه نگهداری هر واحد کالای  $p$  در انبار عمده فروش  $j$  در هر پریود.

$$\sum_i \sum_t y_{pijt} = \sum_k \sum_t u_{pkjt} ; \forall p, j \quad (7-3)$$

$h'_{pk}$ : هزینه نگهداری هر واحد کالای  $p$  در انبار خرده فروش  $k$  در هر پریود.

$$\sum_p \sum_i y_{pijt} \leq ca_{jt} ; \forall j, t \quad (8-3)$$

$Q_{pj}$ : ظرفیت نگهداری انبار عمده فروش  $j$  برای کالای  $p$  در پریود  $t$ .

$$\sum_p \sum_j u_{pkjt} + \sum_p \sum_i v_{pikt} \leq ca'_{kt} ; \forall k, t \quad (9-3)$$

$Q'_{pk}$ : ظرفیت نگهداری انبار خرده فروش  $k$  برای کالای  $p$  در پریود  $t$ .

$$\sum_j \sum_{\tau=1}^t u_{pkj\tau} + \sum_i \sum_{\tau=1}^t v_{pikt} - \sum_{\tau=1}^t d_{pk\tau} = In_{pkt} - B_{pkt} \quad (10-3)$$

$Ca_{jt}$ : ظرفیت تحویل‌گیری کالا در انبار عمده فروش  $j$  در دوره  $t$ .

$$In_{pkt} \leq Q'_{pkt} \cdot v'_{pkt} ; \forall p, k, t \neq T \quad (11-3)$$

$Ca'_{kt}$ : ظرفیت تحویل‌گیری کالا در انبار خرده فروش  $k$  در دوره  $t$ .

$$B_{pkt} \leq bl_{pkt} \cdot (1 - v'_{pkt}) ; \forall p, k, t \neq T \quad (12-3)$$

$$y_{pijt} = 0 ; \forall p, i, j, t | (t > T) \text{ or } (t - a_{ijp} < 1) \quad (13-3)$$

$$v_{pikt} = 0 ; \forall p, i, k, t | (t > T) \text{ or } (t - f_{ikp} < 1) \quad (14-3)$$

$$v'_{pkt} = \{0,1\} ; \forall p, k, t \quad (15-3)$$

$$y_{pijt}, u_{pkjt}, v_{pikt}, In_{pkt}, B_{pkt} \geq 0 ; \forall p, i, j, k, t \quad (16-3)$$

رابطه (۱-۳) مجموع هزینه‌های خرید عمده-فروشان و خرده‌فروشان از تأمین‌کنندگان و هزینه‌های حمل کالاها و هزینه نگهداری کالاها در انبار عمده فروشان و خرده فروشان را حداقل می‌کند. رابطه (۲-۳) به عنوان تابع هدف تحویل بموقع، مجموع مدت زمان ضربدر مقادیر دیرکردها و زودکردهای تحویل کالاها به انبار خرده فروشان را در کل افق برنامه‌ریزی حداقل می‌کند.

مجموعه محدودیت‌های (۳-۳) تضمین می‌کند که مقدار سفارش کالا از عمده فروشان و خرده فروشان به تأمین‌کنندگان در هر دوره از ظرفیت تأمین‌کننده

### ۲-۳- مدل ریاضی پیشنهادی

بر اساس پارامترهای فوق، مدل دو هدفه ذیل برای مسأله ارائه می‌شود:

(1--3)

$$Min Z_1 = \sum_p \sum_k \sum_j \sum_t u_{pkjt} \cdot c_p \cdot o_{jk} +$$

$$\sum_p \sum_i \sum_j \sum_t y_{pijt} (cu_{pi} + c_p \cdot m_{ij}) +$$

$$\sum_p \sum_i \sum_k \sum_t v_{pikt} (cu_{pi} + c_p \cdot n_{ik}) +$$

$$\sum_p \sum_j \sum_{t \neq T} h_{pj} (\sum_i \sum_{\tau=1}^t y_{pij\tau} - \sum_k \sum_{\tau=1}^t u_{pkj\tau}) +$$

$$\sum_p \sum_k \sum_{t \neq T} h'_{kp} \cdot In_{pkt}$$

$$Min Z_2 = \sum_p \sum_k \sum_{t \neq T} (B_{pkt} + In_{pkt}) \quad (2-3)$$

$$\sum_j y_{pij(t+a_{ijp})} + \sum_k v_{pik(t+f_{ikp})} \leq S_{pit} ; \forall p, i, t \quad (3-3)$$

$$\sum_j \sum_t u_{pkjt} + \sum_i \sum_t v_{pikt} = \sum_t d_{pk\tau} ; \forall k, p \quad (4-3)$$

$$\sum_i \sum_{\tau=1}^t y_{pij\tau} - \sum_k \sum_{\tau=1}^t u_{pkjt} \leq Q_{pj} ; \forall p, j, t \neq T \quad (5-3)$$

تجاوز نمی‌کند. مجموعه محدودیت‌های (۳-۴) تأمین کامل تقاضاهای مشتریان را نشان می‌دهد، بدون اینکه میزان موجودی اضافی در انتهای افق برنامه‌ریزی در انبار خرده فروش وجود داشته باشد؛ یعنی میزان کل ورودی به انبار خرده فروشان در طول افق برنامه‌ریزی باید برابر با کل تقاضای مشتری در طول افق برنامه‌ریزی باشد. مجموعه محدودیت‌های (۳-۵) محدودیت ظرفیت نگهداری انبارهای عمده فروشان را در هر دوره بیان می‌کند؛ یعنی تفاضل خروجی‌ها از ورودی‌ها در هر دوره باید در حد ظرفیت انبار باشد.

مجموعه محدودیت‌های (۳-۶) بیان می‌کند که میزان خروجی از انبار عمده فروشان در هر دوره نمی‌تواند از میزان موجودی انبار بیشتر باشد. مجموعه محدودیت‌های (۳-۷) برابری کل ورودی‌ها به انبار عمده فروشان را با کل خروجی‌ها از آن در طول افق برنامه‌ریزی بیان می‌کند. یعنی در انتها موجودی انبارهای عمده فروشان باید صفر باشد. مجموعه محدودیت‌های (۳-۸) و (۳-۹) بیانگر ظرفیت تحویل‌گیری کالاها در انبارهای خرده فروشی و عمده فروشی هستند.

مجموعه روابط (۳-۱۰) میزان موجودی و یا کمبود کالا را در انبار خرده فروشی در هر دوره به دست می‌آورند. مجموعه محدودیت‌های (۳-۱۱) و (۳-۲) نشان می‌دهند که در هر دوره در هر خرده فروشی برای هر کالا فقط یکی از حالت‌های کمبود یا موجودی اضافی می‌تواند وجود داشته باشد. به علاوه؛ حداکثر میزان موجودی و کمبود مجاز هر دوره در انبارهای خرده فروشی را نشان می‌دهند.

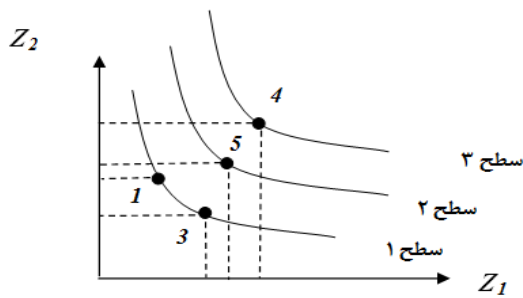
مجموعه محدودیت‌های (۳-۱۳) و (۳-۱۴) عنوان می‌کند که به ازای اندیس‌های خارج از افق برنامه‌ریزی مقادیر حمل صفر خواهد بود. مجموعه محدودیت‌های (۳-۱۵) صفر و یک بودن متغیرهای نشانگر موجودی اضافی یا کمبود در تحویل را نشان می‌دهد. مجموعه محدودیت‌های (۳-۱۶) مثبت بودن مقادیر حمل، کمبود و موجودی اضافی را نشان می‌دهد.

## ۲-۴- روش حل پیشنهادی

ابتدا توضیح مختصری در مورد الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه<sup>۲۱</sup> (PSO) که مورد استفاده در مدل پیشنهادی بوده است، ارائه می‌شود. این الگوریتم به خانواده جدیدی از الگوریتم‌هایی که برای یافتن جواب‌های بهینه و نزدیک به بهینه در مسایل عددی به کار می‌روند، اطلاق می‌گردد. این روش یک الگوریتم بهینه‌سازی احتمالی و بر اساس جمعیت بوده که پس از شبیه‌سازی رفتار اجتماعی گروه پرندگان مدل‌سازی گردید. PSO در آغاز توسط کندی و ابرهارت (۱۹۹۵) بر اساس الگوریتم‌هایی که رفتار دسته جمعی در آنها مانند پرندگان مشاهده شده، توسعه داده شد. این الگوریتم از این جهت که یک الگوریتم بر اساس جمعیت بوده و برای ارزیابی هر جزو (جواب) از تابع برازندگی استفاده می‌کند، شبیه به الگوریتم‌های تکاملی<sup>۲۲</sup> است. اما تفاوت عمده‌ای که وجود دارد، این است که در الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه، هر جواب از حافظه خود بهره‌مند می‌شود و این در مورد الگوریتم‌های تکاملی صادق نیست.

شایان ذکر است که برای تعیین میزان شایستگی<sup>۲۳</sup> جواب‌ها از روشی بر پایه بهینگی پاراتو به صورت





شکل ۱: مثالی از رده‌بندی نقاط غیر مغلوب به-صورتی

که:  $fitness_1 = fitness_3 > fitness_5 > fitness_4$

## ۲-۵- طراحی الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه

در این بخش، رویکردی که برای بهینه‌سازی ذرات انبوه طراحی شده ارائه می‌گردد. در این مقاله، برای الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه چندهدفه از روش کوئلو<sup>۲۴</sup> (۲۰۰۴) و روش ابتکاری بالتر و فوتان<sup>۲۵</sup> (۲۰۱۰) استفاده می‌شود.

### الف) رویکرد حل مسأله

مطابق با نظر کندی<sup>۳۶</sup> (۱۹۹۹) در مدل<sup>۲۷</sup>  $g_{best}$  هر یک از اجزا نسبت به بهترین موقعیت قبلی‌اش و نسبت به بهترین موقعیتی که در کل دسته وجود دارد حرکت می‌کند، اما در حالت در نظر گرفتن چند هدف بطور همزمان، چیزی به نام بهترین موقعیت  $P_g$  وجود ندارد و مجموعه جواب‌های بهینه پاراتو به عنوان جواب‌های بهینه وجود دارند و باید از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده نمود. باید توجه داشت، در الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه استاندارد ابتدا مجموعه ذرات<sup>۲۸</sup> تولید می‌شود. این آغازسازی شامل بردارهای مکان و سرعت خواهد بود.  $p_{best}$  برای هر ذره محاسبه و  $leader$  در آن مکان می‌یابد. سپس برای تعداد مشخصی از تکرار، بردارهای سرعت و مکان بروز می‌شوند که در نتیجه آن  $p_{best}$ <sup>۲۹</sup> و پیشروها<sup>۳۰</sup> نیز به‌روز خواهند شد، اما با کمی تغییر

رده‌بندی جواب‌های غیرمغلوب برای هدایت جامعه به سمت یک جبهه پاراتو استفاده می‌شود. یک بردار تصمیم  $x_\mu \in X$  بهینه پاراتو است اگر و تنها اگر هیچ  $x_\nu \in X$  یافت نشود که  $f(x_\mu) = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$  بر  $f(x_\nu) = (\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m)$  غلبه کند. بدین ترتیب، با هر بار حل مسأله مجموعه‌ای از جواب‌های قابل قبول به دست می‌آیند که هیچ یک به طور مطلق برتر از دیگری نیستند. اصطلاحاً این جواب‌ها را جواب‌های غیرمغلوب می‌گویند. انتخاب یکی از این جواب‌ها از میان سایرین به عواملی بستگی دارد که به ماهیت مسأله وابسته هستند. بنابراین، با تغییر شرایط و یا حتی از نظر تصمیم گیرندگان مختلف، جواب مؤثر انتخاب شده یکسان نخواهد بود.

در ادامه، پس از ارزیابی پارامترهای ذرات و تعیین مقادیر توابع هدف به ازای حل‌های شدنی با استفاده از مفهوم بهینگی پاراتو ذرات جامعه را رده‌بندی می‌کنیم؛ به این صورت که ابتدا از بین تمامی ذرات، ذره‌های غیرمغلوب را در رده اول قرار می‌دهیم. با کنار گذاشتن ذرات رده اول، ذره‌های غیر مغلوب را از بین بقیه ذرات و با توجه به مخزن جدا کرده، در رده پسی قرار می‌دهیم. به همین ترتیب ادامه می‌دهیم تا تمام ذره‌ها رده‌بندی شوند. در شکل (۱) مثالی در سه سطح رده بندی شده اند. ذره‌های سطح اول بیشترین مقدار شایستگی را دارند و به ترتیب از این میزان کاسته می‌شود. در واقع شایستگی در ازای نمودار تراز جبهه پاراتوی دو تابع هدف بررسی می‌شود که هرچه این خطوط تراز به مبدا نزدیک‌تر باشند؛ یعنی این که دو جبهه به هم نزدیک‌تر و توزیع یکنواخت‌تری را ارائه می‌دهند.

بنابراین، متغیرها یا ذراتی می‌توانند مقدار ۱ بگیرند که در رابطه (۱) صدق کنند.

برای ایجاد یک رابطه مستقیم میان مسأله و ذرات الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه برای این مسأله، هر ذره به منزله یک جواب در نظر گرفته می‌شود و دارای  $p$  پس است که به منزله در نظر گرفتن  $p$  نوع کالا است. بدین ترتیب، هر بعد نشان دهنده یک کالا است و ذره به صورت  $X_i' = [x'_{i1}, x'_{i2}, \dots, x'_{ip}]$  نمایش داده می‌شود. هر بعد از هر ذره خود دارای  $k$  پس دیگر است که نشان‌دهنده تعداد  $k$  خرده فروش برای کالای نوع  $p$  است و به صورت  $x'_{ip} = [x'_{ip1}, x'_{ip2}, \dots, x'_{ipk}]$  نمایش داده می‌شود. بدین ترتیب، هر سطر ممکن است دارای تعداد ستون‌های متفاوتی باشد و در کل هر ذره دارای  $kp$  بعد است.

(ج) تعریف پارامترهای اولیه و اصطلاحات به کار

رفته

پارامترهای موجود در این الگوریتم به شرح زیر است:

$T$ : این پارامتر تعیین کننده تعداد کل تکرار است.  
 $NP$ : این پارامتر نشان دهنده تعداد پرندگان و یا اجزای موجود در هر دسته است که این مقدار بر اساس تحقیق تاسگترین<sup>۳۲</sup> (۲۰۰۷) می‌تواند دو برابر ابعاد هر ذره باشد. با توجه به اینکه در مسأله ما ابعاد هر ذره برابر با مجموع کالاهای مختلف برای خرده فروش‌هاست، مقدار  $NP$  به صورت  $NP = 2 \times (kp)$  محاسبه می‌شود که در آن هر خرده فروش می‌تواند هر تعداد از  $p$  کالا را دریافت نماید.

$x_{\min}$ : حداقل مقداری است که مکان هر پرنده آن را تجربه می‌کند که به طور کلاسیک این مقدار برابر با صفر است.

برای حل مسایل چند هدفه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه باید پس از تولید جمعیت اولیه یا swarm، یک مجموعه از leaderها از جمعیت مذکور که ذرات غیرمغلوب را ایجاد می‌کنند، تولید شوند. می‌دانیم که این مجموعه در مخزن نگهداری می‌شود. در هر بار تولید یا به اصطلاح نسل برای هر ذره یک leader انتخاب و یک حرکت یا پرواز صورت می‌گیرد. اکثر الگوریتم‌های ذرات انبوه چند هدفه<sup>۳۳</sup> از تنظیمات اپراتور جهش پس از انجام پرواز بهره می‌برند. در ادامه، یک ذره مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و مطابق با  $p_{\text{best}}$  آن به‌روز می‌گردد، به‌خصوص زمانی که این ذره مغلوب باشد. پس از اینکه همه ذرات بروز شدند، مجموعه leaderها نیز بروز می‌شوند. این فرایند تا تکرار معینی ادامه پیدا می‌کند. در ادامه، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه برای مدل پیشنهادی تشریح می‌گردد.

(ب) طراحی اجزا یا آرایه مکان هر پرنده

با توجه به مدل ریاضی آرایه شده، مشاهده می‌گردد که متغیر اصلی که می‌توان طراحی اجزا را بر اساس آن انجام داد، متغیر  $v'_{pkt}$  است. کلیه متغیرهای دیگر مدل بر اساس این متغیر به دست خواهند آمد. با توجه به مدل ریاضی مسأله، مقدار  $v'_{pkt}$  در صورتی می‌تواند برابر ۱ باشد که با توجه به محدودیت‌های (۳-۱۱) متغیر  $In_{pkt}$  بتواند مقدار مثبت بگیرد؛ بدین مفهوم که موجودی کالای  $p$  در خرده فروشی  $k$  در دوره  $t$  مقداری مثبت باشد. در صورتی می‌توانیم موجودی داشته باشیم که با توجه به محدودیت‌های (۳-۱۳) و (۳-۱۴) حداقل به اندازه کمترین زمان تحویل ممکن از ابتدای افق برنامه‌ریزی گذشته باشد و به عبارتی:

$$t > \min[\min_{i,j}(a_{ijp}), \min_i(f_{ikp})] ; \forall p, k, t \quad (1)$$

ساده تصادفی بر حسب توزیع یکنواخت استفاده شده است. به این منظور، یک جمعیت از ذرات به تعداد  $NP$  آرایه مکان که نشان دهنده مجموعه جواب مسأله هستند، ایجاد شده، خانه‌های آرایه اجزا با استفاده از فرمول زیر به صورت تصادفی با اعداد بین صفر و  $x_{\max}$  پر می‌گردد:

$$x_{ipk}^0 = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) \times r_1$$

$r_1$  یک عدد تصادفی است که از توزیع یکنواخت (۰ و ۱) پیروی می‌کند. بنابراین، به تعداد  $NP$  ذره  $\{X_i^0, i=1,2,\dots, NP\}$  خواهیم داشت.

سرعت اولیه نیز از فرمول مشابهی برای کلیه مکان‌ها و به صورت تصادفی از فرمول زیر ایجاد می‌شود:

$$v_{ipk}^0 = v_{\min} + (v_{\max} - v_{\min}) \times r_2$$

$r_2$  یک عدد تصادفی است که از توزیع یکنواخت (۰ و ۱) پیروی می‌کند. بنابراین، به تعداد ذرات ایجاد شده، سرعت اولیه  $\{V_i^0, i=1,2,\dots, NP\}$  خواهیم داشت.

#### ه) آزمون امکان‌پذیری

از آنجایی که این مسأله دارای محدودیت‌های خاصی است، بنابراین یک مرحله با عنوان آزمون امکان‌پذیری جواب به دست آمده از مرحله قبل در نظر گرفته شده است که محدودیت‌های موجود از قبیل ظرفیت نگهداری انبارها و ورود و خروج از آنها و زمانبندی مربوط به زودکرد و دیرکرد تحویل کالاها در این مرحله بررسی می‌شوند. ذراتی که در این مرحله قابل قبول شناخته شوند، به مرحله پس و تعیین تابع برازندگی آنها خواهند رفت و ذراتی که در این آزمون قابل قبول شناخته نشوند، به مرحله

$x_{\max}$ : حداکثر مقداری است که مکان هر پرنده آن را تجربه کند که به‌طور کلاسیک این مقدار برابر با عدد  $\epsilon$  است.

$v_{\max}$ : این مقدار که همان مقدار بیشینه سرعت است، معمولاً برابر با  $x_{\max}$  است. همچنین، مقدار  $v_{\min} = -v_{\max}$ .

$c_1, c_2$ : این پارامترها که به ضرایب شتاب دهنده معروف بوده، به ترتیب، پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی نامیده می‌شوند، مطابق با نظر کندی و ابرهات می‌توانند در بازه (۰ و ۱) قرار گیرند که معمولاً مقادیر  $c_1, c_2$  برابر ۲ اختیار می‌گردد (البته، نشان داده شده است که بهتر است  $c_1 + c_2 \leq \epsilon$ ).

$\omega$ : این پارامتر ضریب اینرسی است که با توجه به فرمول زیر محاسبه می‌گردد و با توجه به مقالات مختلف مقادیر مناسب برای  $\omega_{start} = 0.9$  و برای  $\omega_{end} = 0.4$  است. در فرمول زیر مقدار  $t$  نشان‌دهنده تعداد تکرارهایی است که تاکنون صورت پذیرفته است و مقدار  $T$  نیز نشان‌دهنده تعداد کل تکرارها است.

$$\omega(t) = \frac{(T - t) \times (\omega_{start} - \omega_{end})}{T} + \omega_{end}$$

بطور کلی با توجه به نظر کندی و ابرهات (۱۹۹۵) مقادیر پارامترهای اولیه تعریف شده در بالا می‌توانند در بازه‌های زیر قرار گیرند:

$$w = (0.8, 1.2) \quad NP = (20, 200)$$

$$c_1 = (1, 4) \quad c_2 = (1, 4) \quad v_{\max} = (3, 40)$$

د) تولید آرایه مکان و سرعت اولیه برای ذرات انبوه  
شمارنده تکرار برابر صفر در نظر گرفته می‌شود یعنی  $t = 0$ . برای تولید آرایه اجزای اولیه، از یک رویکرد

معکوس دارد. تراکم جمعیت از روی تعداد ذراتی که از لحاظ یکی از توابع هدف به یکدیگر نزدیک هستند، سنجیده می‌شود.

با توجه به سرعت به دست آمده، آرایه‌های مکان به صورت فرمول زیر به روز می‌شوند:

$$x_{ipk}^t = x_{ipk}^{t-1} + v_{ipk}^t$$

همانند رویه‌های توضیح داده شده در قسمت‌های (ه) - (ز) آزمون امکان‌پذیری انجام شده و ارزیابی جواب‌ها و تابع برازش به دست می‌آید. اگر ذره یا ذراتی با توجه به آزمون امکان‌پذیری قابل قبول نباشند سرعت آنها مجدداً بروز رسانی شده و آرایه مکان آنها مجدداً محاسبه خواهد شد و رویه تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که کلیه ذرات قابل قبول باشند. مطابق با روش بالتر و فوتان در فضای هدف، تراکم نقاط اطراف هر جواب ذخیره شده در مخزن محاسبه می‌شود و چرخ رولت به‌عنوان تابع انتخاب جواب با تراکم جمعیت رابطه معکوس دارد. تراکم جمعیت از روی تعداد ذراتی که از لحاظ یکی از توابع هدف به یکدیگر نزدیک هستند، سنجیده می‌شود.

در هر تکرار  $t$ ، موقعیت جدید هر ذره با تمام ذرات مقایسه می‌شود و غیرمغلوب‌ها با کلیه جواب‌های ذخیره شده در مخزن مقایسه می‌شوند. سپس مخزن به‌هنگام می‌شود و جواب جدید غیرمغلوب را ذخیره کرده و جواب‌های قدیمی که اکنون مغلوب هستند، حذف می‌شوند. هنگامی که مخزن پر باشد و جواب غیرمغلوب یافته شود، در این صورت این جواب جایگزین یکی از جواب‌های غیرمغلوب دیگر در مخزن می‌شود.

### ح) معیار توقف

هنگامی که تعداد تکرارهای الگوریتم از مقدار تعیین شده فراتر رود، رویه الگوریتم متوقف می‌شود و

قبل باز خواهند گشت تا مجدداً تولید شده و رویه را طی کنند. این فرآیند تا زمانی ادامه خواهد داشت که به تعداد  $NP$  ذره قابل قبول به وجود آید.

### و) ارزیابی جواب‌ها و تابع برازش

در حالت تک هدفه بودن مدل، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه پس از تعیین آرایه زمانبندی، مقدار آن تابع هدف برای همه اجزا محاسبه می‌گردد و سپس با توجه به مدل  $g_{best}$  بهترین مکان برای هر جزو و برای کل اجزا در هر تکرار به دست می‌آید. با توجه به دوهدفه بودن مدل پیشنهادی که در قسمت قبل آرایه شده است، نمی‌توان یک بهترین مکان را محاسبه نمود و در عوض، مجموعه جواب‌های بهینه پاراتو به عنوان جواب‌های بهینه وجود دارند. بدین ترتیب مطابق با روش کوللو و همکاران (۲۰۰۴) عملکرد ذرات مختلف متناسب با مغلوبیت آنها سنجیده می‌شود و یک مخزن برای ذخیره ذرات غیرمغلوب در نظر گرفته شده است.

### ز) به‌روز رسانی رویه

به شمارنده تکرار یک عدد اضافه می‌شود و  $t = t + 1$ . ضریب اینرسی با توجه به فرمول گفته شده در قسمت ج بروز می‌شود. سرعت هر آرایه به صورت فرمول زیر به روز رسانی می‌شود:

$$v_{ipk}^t = W^{t-1} \cdot v_{ipk}^{t-1} + c_1 r_1 \cdot (p_{ipk}^{t-1} - x_{ipk}^{t-1}) + c_2 r_2 \cdot (R_h^{t-1} - x_{ipk}^{t-1})$$

$R_h$  یک جوابی است که از مخزن خارجی در هر تکرار  $t$  انتخاب شده است. این انتخاب در حالتی انجام می‌شود که جواب‌های غیرمغلوب در مناطقی از فضای هدف که دارای تراکم بیشتر جمعیت است، واقع شده‌اند و دارای احتمال کمی برای انتخاب هستند. مطابق با روش بالتر و فوتان (۲۰۱۰)، در فضای هدف، تراکم نقاط اطراف هر جواب ذخیره شده در مخزن را محاسبه می‌شود و چرخ رولت به عنوان تابع انتخاب جواب با تراکم جمعیت رابطه

الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه آرایه شده و روش شبیه‌سازی به شرح زیر است:

$c_1, c_2$  (پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی) -  $\omega_{star}$   
 $\omega_{end}$  (ضریب اینرسی) -  $x_{min}$  (حداقل مقدار آرایه مکان هر جز) -  $x_{max}$  (حداکثر مقدار آرایه مکان هر جز) -  $v_{max}$  (مقدار بیشینه سرعت) -  $NP$  (تعداد حل‌های شدنی ایجاد شده در هر گروه) -  $T$  (تعداد تکرار برای رسیدن به حل بهتر) -  $P$  (تعداد انواع کالاها) -  $k$  (تعداد خرده فروش‌ها) -  $I$  (تعداد انواع تأمین‌کنندگان) -  $J$  (تعداد انواع عمده فروش‌ها)

بر اساس اطلاعات ورودی، کد مورد نظر در برنامه ویژوال بیسیک اجرا می‌شود که به شرح زیر است: در ابتدا کلیه اطلاعات ورودی فرا خوانده می‌شود، آغازسازی اولیه مطابق با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه چندهدفه ایجاد خواهد شد. برای کل اجزای دسته، آرایه مکان و همچنین، آرایه مربوط به سرعت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌گردند. سپس آرایه‌های مکان ایجاد شده برای کل اجزای دسته مطابق با شرحی که در قسمت قبل داده شده، مورد آزمون امکان‌پذیری قرار می‌گیرند و اگر امکان‌پذیر نباشند، فرآیند تولید ذرات مجدداً رخ می‌دهد. سپس مطابق با فرمول‌های آرایه شده در بخش قبل آرایه‌های سرعت و مکان هر یک از اجزای دسته به روز می‌گردد و رویه‌ای که در بالا شرح داده شد، تا زمان برآورده شدن معیار توقف، که تعداد تکرارها به عنوان معیار توقف در نظر گرفته شده است، ادامه پیدا می‌کند؛ بدین ترتیب، یک حل اولیه خواهیم داشت. در نهایت، خروجی مورد نظر که به شرح زیر خواهد بود، آرایه می‌شود.

برای مقایسه جواب‌های غیرمغلوب به دست آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه با نرم‌افزار

جواب به دست آمده، بهترین جواب حاصل از اجرای الگوریتم در همه تکرارها و از همه ذرات و جواب نهایی است.

ط) جستجوی موضعی برای الگوریتم پیشنهادی در این الگوریتم پس از به دست آوردن بهترین مکان برای کل اجزا در هر تکرار از یک الگوریتم جستجوی موضعی برای یافتن بهترین مکان‌های همسایگی نیز استفاده می‌گردد. مکان‌های همسایگی به صورت زیر تولید می‌گردد:

۱- جابه‌جایی دوره‌های مربوط به هر آرایه.

۲- استفاده از عملگر تقاطع ستونی که در آن ابتدا تصادفاً یک نقطه برش در برای ستونی به تصادف در آرایه انتخاب می‌شود و سپس مطابق شکل بخش‌های متناظر آرایه با یکدیگر تعویض می‌گردند.

پس از اجرای جستجوی موضعی، مقادیر جدیدی برای ذرات تولید خواهد شد که پس از تبدیل آنها به آرایه مورد نظر، این ذرات جدید نیز نیاز به عبور از آزمون امکان‌پذیری دارند. چنانچه ذرات توسط این آزمون مورد قبول باشند، به مرحله تعیین تابع برازندگی و ادامه رویه می‌روند؛ در غیر این صورت تقاطع ستونی دیگری برای جستجوی موضعی انجام می‌شود و این رویه تا زمانی ادامه خواهد داشت که ذرات حاصل از جستجوی موضعی همگی قابل قبول باشند.

### ۳- تحلیل نتایج محاسباتی

به منظور حل مسأله مورد نظر، پس از تعریف آرایه مکان و پارامترها و الگوریتم جستجوی موضعی، در گام اول پارامترهای ورودی برای مسأله مورد نظر تعریف می‌گردند. ورودی‌های مسأله برای بکارگیری

کانال‌ها و مقادیر توزیع و یا نگهداری کالاها در انبارها مؤثر است و از طرف دیگر، ترکیب مقادیر پارامترهای عنوان شده با پارامترهای مربوط به هزینه‌های شبکه توزیع در مقادیر توابع هدف نسبت به یکدیگر تأثیرگذار است، در هر اندازه، چندین مسأله با ترکیب‌های متفاوت از مقادیر این پارامترها مطابق جدول (۳) و به صورت تصادفی بین حدود بالا و پایین طراحی شده‌اند تا به گونه‌ای شرایط مختلف دنیای واقعی شبیه سازی شده باشد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که زمان حل الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه با افزایش تعداد متغیرهای صفر و یک مدل افزایش می‌یابد.

در شکل (۲) متوسط زمان صرف شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه برای حل مسایل در ابعاد مختلف بسته به تعداد متغیرهای صفر و یک آنها آورده شده است. به علاوه، با افزایش ابعاد مسأله نسبت زمان حل الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه به زمان حل لینگو کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد با افزایش ابعاد مسأله الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه جواب‌هایی با کیفیت خوب را در مدت زمانی به مراتب کمتر از روش دقیق به دست می‌آورد. این موضوع در شکل (۳) نشان داده شده است.

لینگو، مقدار تابع هدف  $Z_2$  مربوط به هر جواب به صورت محدودیتی وارد مدل ریاضی اصلی شده و مقدار حداقل تابع هدف  $Z_1$  در مدل جدید شامل محدودیت‌های اصلی و محدودیت اضافه شده محاسبه می‌شود. همچنین، برای مقایسه کیفیت جواب‌ها در این دو روش نیز معیارهایی بر اساس اختلاف مقادیر متناظر تابع هدف  $Z_1$  در دو روش به ازای  $Z_2$  های یکسان تعریف شده است که در واقع نشان دهنده فاصله دو جبهه پاراتو به دست آمده از دو روش هستند. برای ارزیابی کیفیت الگوریتم طراحی شده، مسایل آزمایشی در ابعاد مختلف توسط الگوریتم حل شده‌اند. در ابعاد کوچک این مسایل توسط هر دو روش لینگو و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه طراحی شده حل شده و نتایج آنها با هم مقایسه شده است. ابعاد مسایل آزمایشی طراحی شده در جدول (۲) آورده شده است.

شایان ذکر است به عنوان مرجعی برای تعیین اندازه مسائل آزمایشی، اندازه مسائل حل شده در ادبیات مسائل توزیع در مدیریت زنجیره تأمین از نظر پارامترهای مربوط به تعداد تسهیلات هر رده و یا تعداد انواع محصولات بررسی شد.

از آنجا که از یک طرف مقادیر پارامترهای مربوط به ظرفیت‌ها و مقادیر تقاضا در مدل در مشخصات جواب‌های به دست آمده شامل چگونگی انتخاب

جدول ۲: ابعاد مسایل آزمایشی طراحی شده

	کد اندازه مسایل	تعداد محصولات	تعداد تأمین کنندگان	تعداد عمده فروشان	تعداد خرده فروشان	تعداد دوره ها	تعداد متغیرهای صفر و یک
ابعاد کوچک	2-2-3-4-6	2	2	3	4	6	40
	2-2-2-15-6	2	2	2	15	6	150
	2-3-5-10-12	2	3	5	10	12	220
	4-2-8-15-6	4	2	8	15	6	300
ابعاد بزرگ	8-6-12-45-12	8	6	12	45	12	3960
	8-8-15-60-12	8	8	15	60	12	5280
	10-5-15-75-12	10	5	15	75	12	11010

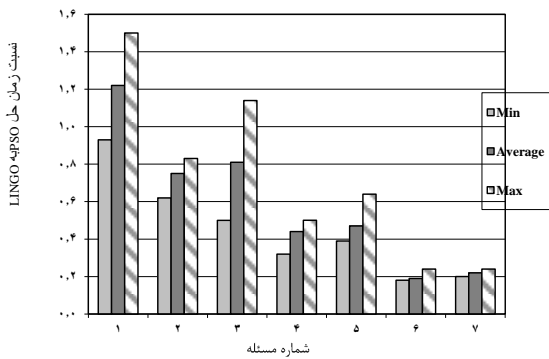
جدول ۳: محدوده مقادیر پارامترهای مدل در مسایل آزمایشی

	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳	نوع ۴
$Q$	[800,1300]	[400,800]	[600,1600]	[500,700]
$Q'$	[100,200]	[150,400]	[100,200]	[100,200]
$h$	[500,1500]	[500,1500]	[500,1500]	[100,300]
$h'$	[500,1500]	[500,1500]	[500,1500]	[100,250]
$cu$	[1000,5000]	[1000,5000]	[1000,5000]	[100,600]
$c$	[50,100]	[50,100]	[50,100]	[50,100]
$m$	[50,500]	[200,1000]	[50,550]	[200,450]
$n$	[500,1500]	[500,1500]	[50,550]	[500,700]
$o$	[200,1000]	[50,500]	[50,550]	[200,450]
$a$	[1,3]	[1,3]	[1,3]	[1,3]
$f$	[1,3]	[1,3]	[1,3]	[1,3]
$d$	[50,100]	[50,100]	[20,50]	[50,100]
$S$	[800,800+240*K/I]	[2000,2000+240*K/I]	[1000,1000+240*K/I]	[400,400+160*K/I]
$ca$	[700,700+160*P*K/J]	[500,500+240*P*K/J]	[500,500+160*P*K/J]	[70,70+160*P*K/J]
$ca'$	[500,500+160*P]	[300,300+240*P]	[300,300+160*P]	[200,200+160*P]
$bl$	[500,700]	[100,500]	[150,500]	[150,500]

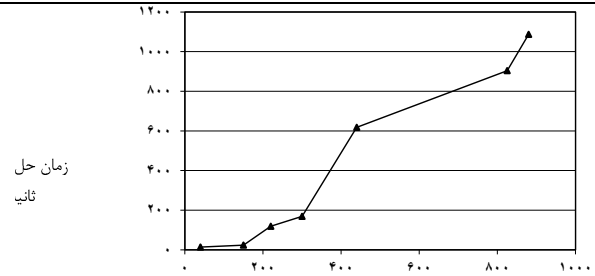
شده برای آنها صفر باشد، بر نقاط متناظر خود روی جبهه پارتوی لینگو منطبق هستند. در این مثال، نقاط متناظر  $(D_1, D_2)$  و  $(E_1, E_2)$  با مقادیر درصد خطای ۲/۰٪ تقریباً بر هم منطبق هستند، که در این مثال به ترتیب ۳۰۶۹، ۲۱۶۱، ۹۴۶، ۵۳۲، ۲۷۲۴، ۹۲۴، ۴۶۴۷ و ۲۵۲۵ هستند.

ملاحظه می‌کنید که هر چه این اعداد در کل به هم نزدیک‌تر باشند، به این معنی است که نقاط به طور یکنواخت از لحاظ مقادیر  $Z_2$  شان (با فواصل یکسان) در طول جبهه توزیع شده‌اند و این بدان معنی است که انحراف معیار این اعداد نسبت به میانگین شان کمتر خواهد بود. بنابراین، هر چه مقدار نسبت میانگین به انحراف معیار بیشتر باشد، توزیع نقاط یکنواخت‌تر است.

شکل (۴) جبهه‌های پارتوی به دست آمده از دو روش را نشان می‌دهد. این شکل به روش‌تر شدن مفهوم معیارهای استفاده شده برای مقایسه دو روش شامل درصد خطای مقادیر  $Z_1$  و درصد انطباق دو جبهه و همچنین، میزان پراکندگی نقاط روی آن کمک می‌کند. در این شکل نقاط متناظر روی دو لبه که مقادیر  $Z_1$  یکسان دارند با عناوین یکسان و اندیس‌های متفاوت نشان داده شده‌اند. برای محاسبه معیار درصد خطای مقادیر  $Z_1$  در جبهه پارتوی به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه، طبق جدول (۱) درصد اختلاف مقادیر  $Z_1$  نقاط  $A_1$  تا  $I_1$  از مقادیر  $Z_1$  نقاط متناظر  $A_2$  تا  $I_2$  محاسبه می‌شود. میانگین، حداقل و حداکثر مقادیر محاسبه شده به عنوان معیارهای خطای جبهه پارتوی PSO نسبت به جبهه لینگو قلمداد می‌شوند. نقاطی که مقدار محاسبه

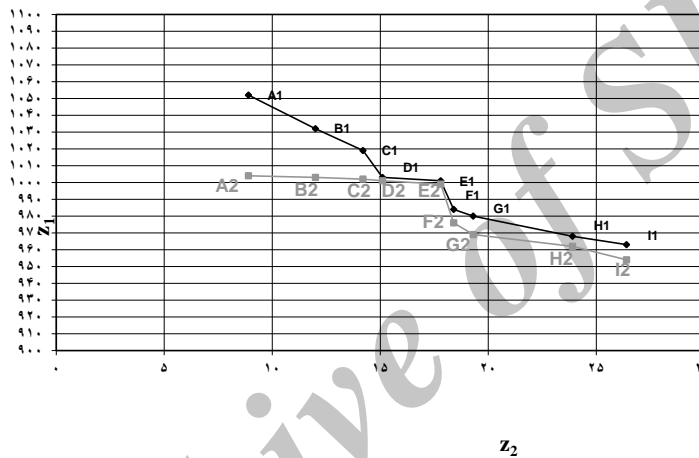


شکل ۳: نمودار مقادیر میانگین، حداقل و حداکثر نسبت زمان حل PSO به Lingo در هر اندازه



تعداد متغیرهای صفر و یک

شکل ۲: نمودار متوسط زمان حل الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه بر حسب تعداد متغیرهای صفر و یک



شکل ۴: نمودار دو جبهه به دست آمده از دو روش

(خط پررنگ مربوط به PSO و خط کم رنگ مربوط به Lingo ارتباط دارند).

#### ۴- نتیجه‌گیری

بموقع در ادبیات موضوع گاهی در قالب هزینه‌های دیرکرد و زودکرد آورده شده است، ولی در نظر گرفتن آن در قالب تابع هدف جدیدی در تضاد با تابع هدف هزینه‌ها بحث بهینه‌سازی چند هدفه را به وجود می‌آورد که به شکل واقعی‌تری بیانگر شرایط دنیای واقعی است. از آنجا که با یک مدل برنامه‌ریزی مختلط روبه‌رو هستیم، با افزایش خطی تعداد متغیرهای صفر و یک زمان حل آن به طور نمایی افزایش می‌یابد که در ابعاد واقعی دیگر قابل حل با روش‌های دقیق نیست. از این رو، برای حل این مسأله از یک الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه چند

در این مقاله، به طراحی مدلی برای شبکه توزیع کالاهای مورد نیاز مشتریان در زنجیره تأمین سه رده ای شامل تأمین کنندگان، عمده‌فروشان و خرده فروشان پرداخته شده است که خروجی آن تعیین می‌کند در یک افق برنامه‌ریزی چه مقدار از چه قلم کالایی در چه زمانی از چه مکانی به چه مکان دیگر ارسال شود تا در کنار کمینه کردن هزینه‌های زنجیره تأمین شامل هزینه‌های نگهداری و حمل، که غالباً در ادبیات موضوع دیده می‌شود، هدف مهم دیگری با عنوان تحویل به موقع نیز تأمین شود. بحث تحویل



optimization solver for spreadsheet models: application to water quality", In: *Proceedings of the 26<sup>th</sup> Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, pp. 20-22.

Chan, F.T.S., Chung, S.H., Wadhwa, S., (2005). A hybrid genetic algorithm for production and distribution. *Omega*, 33(4), 345-355.

Coello, C.A.C., Pulido, G.T., and Lechuga, M.S., (2004), "Handling multiple objectives with particle swarm optimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(3), 256-279.

Dasci, A., Verter, V., (2001). A continuous model for production-distribution system design. *European Journal of Operational Research* 129, 287-298.

Jayaraman, V., Pirkul, H., (2001). Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities. *European Journal of Operational Research*, 133, 394-408.

Kennedy, J., (1999), "Effects of neighborhood topology on particle swarm performance", In: *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1931-1938.

Kennedy, J. and Eberhart, R., (1995), "Particle swarm optimization", In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 4, pp. 1942-1948.

Korpela, J., Lehmusvaara, A., (1999). A customer oriented approach to warehouse network evaluation and design. *Int. J. of Production Economics*, 59, 135-146.

Miranda, P.A., Garrido, R.A., (2004). Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand. *Transportation Research - Part E*, 40, 183-207.

Nozick, L.K., (2001). The fixed charge facility location problem with coverage restrictions. *Transportation Research - Part E*, 37, 281-296.

Qu, W.W., Bookbinder, J.H., Iyogun, P., (1999). An integrated inventory-transportation system with modified periodic policy for multiple products.

هدفه استفاده شد که با هر بار حل مسأله به جای تنها یک نقطه بهینه مجموعه‌ای از نقاط غیرمغلوب را به دست می‌آورد. برای ارزیابی کیفیت الگوریتم طراحی شده، مسائلی آزمایشی در ابعاد مختلف و با مشخصات مختلف به طوری که شرایط مختلف دنیای واقعی را شبیه سازی کند، طراحی شدند. نتایج این آزمایش‌ها هم از لحاظ کیفیت جواب‌های به دست آمده و هم از نظر زمان حل در ابعاد کوچک با جواب‌های حاصل از نرم افزار بهینه سازی لینگو مقایسه گردید. نتایج حاصل از این محاسبات نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه طراحی شده از کیفیت خوبی در زمان حل کمتری برخوردار است و در ابعاد بزرگ نیز در مدت زمان مناسبی به جواب می‌رسد.

موارد زیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود:

- در این مقاله، هزینه‌های حمل واحد کالا بر اساس مسافت حمل تعریف شده است. می‌توان در سیستم توزیع، ناوگان حمل را نیز وارد کرد و هزینه‌های حمل را به صورت هزینه سفر و سائل نقلیه تعریف کرد. در این صورت بحث حجم کالاها و محدودیت ظرفیت و سائل نقلیه مختلف پیش می‌آید.
- کالاها در زنجیره تأمین می‌توانند تاریخ انقضاء داشته باشند و باید قبل از تمام شدن تاریخ انقضاء به دست مشتری برسند. این مسأله روی زمان سفارش و مدت زمان نگهداری کالاها در انبارها تأثیر می‌گذارد.
- در کنار این دو تابع هدف، تابع هدف دیگری مثل حداکثر کردن استواری تصمیمات را می‌توان همراه با مقادیر غیرقطعی تقاضا در نظر گرفت.

منابع:

Balter, A.M. and Fontane, D.G., (2010), "A generalized multiobjective particle swarm

- 11 Sabri and Beamon  
 12 Chan et al  
 13 Jayaraman and Prikul  
 14 Dasci and Verter  
 15 Nozick  
 16 wang  
 17 Syarif  
 18 Zhou  
 19 Syam  
 20 Miranda and Garrido  
 21 Particle Swarm Optimization  
 22 Evolutionary  
 23 Fitness  
 24 Coelo  
 25 Balter and Fontane  
 26 Kennedy  
 27 Global best  
 28 Swarm  
 29 Pareto best  
 30 Leader  
 31 Multi-Objective PSO (MOPSO)  
 32 Tasgetiren

*European Journal of Operational Research*, 115, 254-269.

Sabri, E.H., Beamon, B.N., (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28, 581-598.

Syam, S.S., (2002). A model and methodologies for the location problem with logistical components. *Computers & Operations Research*, 29, 1173-1193.

Syarif, N., Yun, Y., Gen, M., (2002). Study on multi-stage logistic chain network: a spanning tree based genetic algorithm approach. *Computers & Industrial Engineering*, 43, 299-314.

Tan, K.C., (2001). A framework of supply chain management literature. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 7, 39-48.

Tasgetiren, M.F., Yun-Chia L., Mehmet S., and Gunes G., (2007), "A particle swarm optimization algorithm for makespan and total flowtime minimization in the permutation flowshop sequencing problem", *European Journal of Operational Research*, 177, 1930-1947.

Wang, W., Fung, R.Y.K., Chai, Y., (2003). Approach of just-in-time distribution requirements planning for supply chain management. *Int. J. of Production Economics*, 91, 101-107.

Zhou, G., Min, H., Gen, M., (2002). The balanced allocation of customers to multiple distribution centers in the supply chain network: A genetic algorithm approach. *Computers & Industrial Engineering*, 43, 251-261.

پی نوشت:

- 1 Supply Chain Management  
 2 Integration  
 3 Cooperation  
 4 First in-First out  
 5 Manufacturing Resource Planning  
 6 Value chain  
 7 Tan  
 8 Qu  
 9 Korpela and Lehmusvaara  
 10 Analytical Hierarchy Process