

## ارائه مدل بهینه‌سازی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز کالاهای فاسدشدنی

زهرا کوچک‌زاده<sup>۱</sup>، سعیده غلامی<sup>۲\*</sup>، دنیا رحمانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### خلاصه

آلودگی هوا و انتشار گاز CO<sub>2</sub>، یک مسأله مهم جهانی است، و کاهش انتشار کربن یکی از مهم‌ترین اهداف است. در زنجیره تأمین محصولات فسادپذیر، تحویل و توزیع موضوع بسیار مهمی است، که همواره بسیاری از پژوهشگران به آن توجه نموده‌اند. در این پژوهش برای مدل‌سازی زنجیره تأمین سبز، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط استفاده نموده‌ایم، که شامل دو تابع هدف بهینه‌سازی سود و کمینه‌سازی انتشار گاز CO<sub>2</sub> است. به دلیل بروز پدیده‌های تصادفی، پارامترهای هزینه و قیمت به صورت غیرقطعی است که از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده نموده‌ایم، و یک مدل جدید بهینه‌سازی استوار ارائه نمودیم. این مسأله در دسته مسائل ان پی هارد است و روش حل دقیق در ابعاد بزرگ کارآمد نیست. برای حل دقیق مسأله روش اپسیلون محدودیت و برای حل در ابعاد بزرگ الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط، شبیه‌سازی تبرید چندهدفه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه استفاده شد. به منظور دستیابی به بهترین و دقیق‌ترین جواب‌ها در الگوریتم‌های فراابتکاری، پارامترها با کمک طراحی آزمایش‌ها، تنظیم شد. باتوجه به نتایج حاصل از آزمون‌های محاسباتی، میانگین اختلاف با جواب بهینه ۰/۲ تا ۰/۸ درصد و در مدل‌های استوار ۰/۷ تا ۰/۹ درصد است، این مقدار قابل قبول است. کمترین زمان اجرا به ترتیب مربوط به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه، ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه است، و کارآمدی این الگوریتم‌ها باتوجه به معیارهای استاندارد چندهدفه تفاوت معنی‌داری ندارند.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۱/۱/۲۸

پذیرش ۱۴۰۱/۴/۲۰

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

شبکه زنجیره تأمین محصولات

فساد پذیر

برنامه‌ریزی عدم قطعیت

بهینه‌سازی استوار

الگوریتم فراابتکاری

### ۱. مقدمه

محصولات فاسدشدنی مانند محصولات کشاورزی، لبنیات، گوشت و سایر مواد غذایی، در صورتی که تاریخ مصرفشان بگذرد، غیرقابل استفاده شده و موجب بیماری می‌شوند. بنابراین زنجیره تأمین آن‌ها باید به گونه‌ای مدیریت شود که در زمان مناسب به مصرف برسند. همچنین، باتوجه به اینکه فاسد شدن آن‌ها موجب متضرر شدن تولیدکننده می‌شود باید به اندازه مناسب و به مقدار تقاضای بازار تولید شوند. باتوجه به منابع طبیعی مصرف‌شده برای تولید محصول، لازم است ضررهای زیست‌محیطی را با مصرف در زمان مناسب و تولید به

مقدار تقاضا، به حداقل برسانیم. باتوجه به مطالعات انجام شده، محصول فاسد را می‌توان به چرخه‌ی تولید محصول بازگرداند، به گونه‌ای که محصولات جدید تولید شود. مثلاً در محصولات کشاورزی مانند مرکبات می‌توان تبدیل میوه فاسد شده را برای تولید کود کمپوست استفاده کرد. در این صورت مقدار محصول به دست آمده از مرکز تولید کمپوست، به تولیدکننده که همان باغ‌های میوه هستند، بازگردانده می‌شود. این فرآیند برای محصولات مختلف کشاورزی، متفاوت است، مثلاً برای محصول خرما، این فرآیند به گونه‌ای است که از برگ درختان خرما برای تولید کمپوست استفاده می‌شود. همچنین باتوجه به حجم

\* نویسنده مسئول: سعیده غلامی

تلفن: پست الکترونیکی: s\_gholami@kntu.ac.ir

## ۲. مرور کلی بر ادبیات موضوع

محصولات و سایر اقلام کشاورزی در طول چرخه عمر چندین بار از بازار بازگردانده می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهد که بازگشت محصولات بلافاصله پس از فروش آن‌ها به‌طور متوسط حدود ۶٪ است [۱]. علاوه بر این، حقوق مشتری برای بازگرداندن محصولات باعث رضایت مشتری می‌شود. در پایان عمر محصول، به‌دلیل افزایش قوانین در مورد بازپس‌گیری اجباری، منافع حاصل از بازگشت محصول اتفاق می‌افتد. برای مدت طولانی، بازگشت محصول به‌عنوان یک ضرر برای تولیدکننده تلقی می‌شد، که مدیریت بازیابی محصول، آن را به‌عنوان مدیریت تمام اقلام دور ریخته شده، فروخته نشده، ناخواسته یا معیوب دانست، که یک شرکت تولیدی به‌طور قانونی، قراردادی یا به نحو دیگری مسئول آن می‌باشد. ادبیات اخیر از عبارت مدیریت زنجیره‌تأمین حلقه‌ی بسته استفاده می‌کند که عبارت است از طراحی، کنترل و عملیات یک سیستم برای به حداکثر رساندن ارزش آفرینی در کل چرخه عمر یک محصول با بازیابی پویا می‌باشد. از زاویه زنجیره‌تأمین، بازگشت محصول می‌تواند اثرات مخرب زیست‌محیطی را کاهش دهد، رضایت مشتری ایجاد کند و منابع را تأمین کند. درآمدهای حاصل از بازگشت محصول، از هزینه‌های ناشی از احداث کانال بازگشت فراتر می‌رود [۲]. اما داده‌های مرتبط و به‌روز در مورد بازگشت‌ها و شیوه‌های بازگشت کمیاب است، درحالی‌که چنین داده‌هایی برای نشان دادن ارزش بازگشت محصول و ایجاد یک تجارت برای مدیریت بازگشت محصول به متخصصان ضروری است.

در جهان امروز تغییرات در عرصه اقتصاد و صنعت با سرعت زیادی در حال وقوع است. هدف سازمان‌ها افزایش سود و دوام بیشتر در بازار است، به‌طوری‌که جهانی شدن فعالیت‌های اقتصادی، شرکت‌ها را در رقابت تنگاتنگ قرار داده است [۳].

در تحقیقات انجام شده، کمتر تحقیقی با هدف کاهش آلودگی هوا انجام شده بود. ما در مدل بررسی شده، تابع هدف کاهش آلودگی هوا را علاوه بر تابع هدف بیشینه‌سازی سود در نظر گرفتیم. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مقالات منتشر شده پیرامون زنجیره‌تأمین حلقه بسته نشان داده شده است.

## ۳. توضیح مسأله

در این تحقیق، مدل بررسی شده مربوط به یک مسأله زنجیره‌تأمین چندسطحی است، که برای کارخانه لبنیات در نظر گرفته شده است. بنابراین قسمتی از محصول بازگشتی از انبارها و خرده‌فروش‌ها بازیافت و قسمتی منهدم می‌شوند. این مسأله را هم می‌توان به‌عنوان یک مسأله مدیریت لجستیک معکوس در نظر گرفت [۴]. در مسأله بررسی شده از برنامه‌ریزی عدم قطعیت استفاده شده است که باعث مشارکت فعال تصمیم‌گیرنده می‌شود. از این‌رو، به تصمیم‌گیرنده یک دید کلی از پیامدهای تصمیمات خاص ارائه می‌دهد. در نتیجه، رویه‌های راه‌حل مورد استفاده برای مقابله با مسأله عدم قطعیت می‌باشد. این تحقیق به‌شرح زیر تنظیم شده است. به‌منظور حل این مسأله، در بخش ۴ یک

زیاد برگ‌های خشک شده، اقدام به سوزاندن آن‌ها می‌کردند، که باعث آلودگی شدید هوا می‌شد. اما امروزه با توجه به ایجاد کارخانه‌های تولید کمپوست در مسیر باغداران خرما، برگ‌های خشک شده این درختان به کارخانه‌های تولید کمپوست انتقال داده می‌شود. احداث این کارخانه‌ها علاوه بر جلوگیری از آلودگی هوا، باعث اشتغال‌زایی می‌شود. بنابراین برگرداندن محصولات فسادپذیر به چرخه مصرف دارای اهمیت است. امروزه با توجه به افزایش جمعیت و نیاز به تولید انبوه مواد غذایی، افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی باعث نگرانی مدیران شده است. از این جهت اگر بتوان محصولاتی که قابل استفاده نیستند را به چرخه مصرف برگرداند، این فرآیند باعث کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی می‌شود. در محصولات کشاورزی این کار بیشتر از طریق تولید کمپوست از میوه‌های فاسد شده صورت می‌گیرد. مواد معدنی خاک‌های زیر کشت در اثر مرور زمان و کشت‌های مکرر کاهش پیدا می‌کند. رساندن کمپوست به تولیدکننده و استفاده از آن توسط کشاورزان، باعث غنی شدن خاک‌های زیر کشت می‌شود. همچنین خاک‌هایی با مواد معدنی بالا و غنی برای کشت محصولات کشاورزی بسیار مناسب هستند.

به‌دلیل توجه روزافزون به محیط زیست سالم و همچنین حفظ و نگهداری محیط زیست برای آیندگان، در این پژوهش تابع هدف زیست‌محیطی برای کنترل و کاهش آلودگی هوا در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به عدم قطعیت در قیمت و هزینه با در نظر گرفتن تحت سناریوهای مختلف، مدل بهینه‌سازی استوارسازی ارائه شده است. نوآوری‌های این پژوهش عبارتند از:

- در نظر گرفتن معیار کمیینه‌سازی تولید گاز CO<sub>2</sub> در طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته کالاهای فاسدشدنی و ارائه مدل چندهدفه.
  - حل مدل چندهدفه به‌طور دقیق با روش اپسیلون محدودیت و حل مسأله در اندازه بزرگ با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری.
  - به‌منظور به‌دست آوردن بهترین جواب‌های ممکن و دستیابی به جواب‌های دقیق‌تر، تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری، با کمک طراحی آزمایش‌های تاگوچی
  - در نظر گرفتن پارامترهای هزینه و قیمت به‌صورت غیرقطعی و مدل‌سازی مسأله با رویکرد بهینه‌سازی استوار.
- ادبیات موضوع به‌صورت کلی در بخش ۲ مرور شده است، و جزئیات مدل‌های پیشنهادی در بخش ۳ توضیح داده شده است. روش‌های حل مسأله در بخش ۴ ارائه شده است، که برای حل این مسأله از روش دقیق اپسیلون محدودیت و با توجه به پیچیدگی‌های محاسباتی این مسأله، برای حل کارآمد در ابعاد بزرگ، الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط، شبیه‌سازی تبرید چندهدفه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه ارائه شده است. برای تحلیل کارآمدی الگوریتم‌های پیشنهادی آزمون‌های محاسباتی در بخش ۵ بیان شده است و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده در بخش ۶ است.

- می‌باشند.
- برخی پارامترها مانند هزینه و قیمت دارای عدم قطعیت می‌باشند.
- هزینه نگهداری محصول در انبار، مراکز تولید و خرده‌فروش در نظر گرفته می‌شود.
- فلش‌های سبز جریان‌های بازگشتی است.
- بازگشت از مراکز خرده‌فروش و انبار صورت می‌گیرد.
- موجودی در انتهای هر دوره برای مراکز تولید و انبار و خرده‌فروش صفر است.
- نصف محصولات بازگشتی منهدم و نصف آن بازیافت می‌شوند.
- هر تولیدکننده از یک تأمین‌کننده محصول دریافت می‌کند.
- هر انبار به یک خرده‌فروش محصول می‌فرستد.
- در مدل مفروض بازگشت و انتقال به مراکز انهدام و بازیافت نمی‌تواند به‌طور هم‌زمان از مراکز تولید و انبار صورت پذیرد، بنابراین در این مدل فرض براین گرفته شد که بازگشت از انبار صورت پذیرد، و از مراکز تولید، انتقال به مراکز انهدام و بازیافت نداریم.

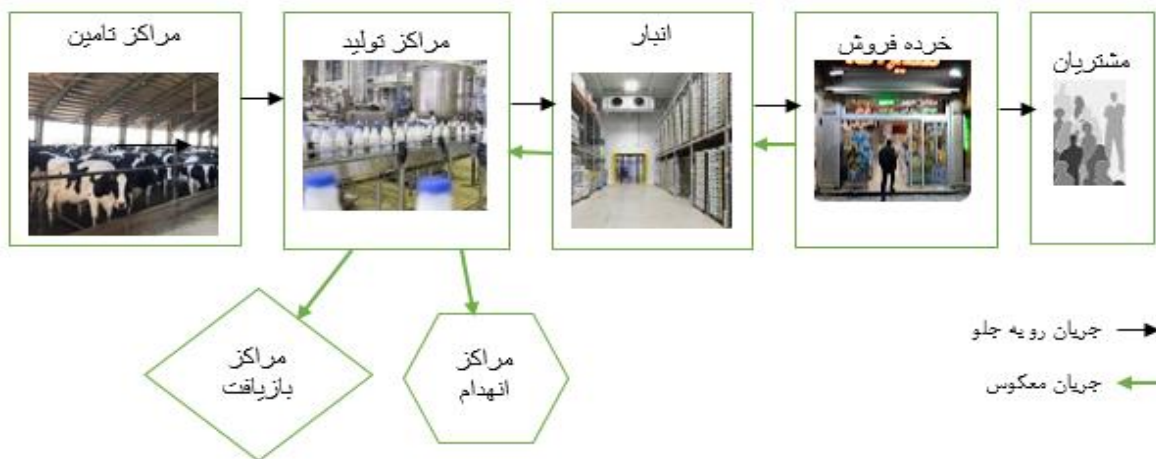
مدل ریاضی را معرفی می‌کنیم و ساختار ویژه مسأله زنجیره‌تأمین محصول لبنیات را نیز تجزیه و تحلیل می‌کنیم. در بخش ۵ مسأله عدم قطعیت با رویکرد استوار مالوی<sup>۱</sup> را بررسی می‌کنیم و در نهایت، در بخش آخر به نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آینده می‌پردازیم.

### ۳-۱. مدل قطعی

به‌طور کلی، در این پژوهش مدل‌سازی یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌ی بسته برای محصولات فسادپذیر مبتنی بر مدل پیشنهادی میرمجلسی [۵] است. این مدل مشتمل بر مشتریان، مراکز تولید، تأمین، انبار، خرده‌فروش، انهدام و بازیافت است. شبکه لجستیک مسأله، در شکل (۱) نشان داده شده است.

مفروضات مدل:

- شبکه زنجیره‌تأمین چند دوره و چند محصول می‌باشد.
- شبکه زنجیره‌تأمین در رفت دارای پنج سطح و همچنین در برگشت دارای پنج سطح می‌باشد.
- مکانیابی مراکز تأمین و انبار و انهدام و بازیافت صورت می‌گیرد.
- همه مراکز دارای ظرفیت و خرده‌فروشان و مشتریان دارای تقاضا



شکل (۱): زنجیره‌تأمین چند سطحی

شاخص‌ها:	$bc_{rt}$	هزینه تأمین هر واحد محصول توسط تأمین‌کننده $i$
$i \in I$	$bcc_{ct}$	هزینه بازگشت محصول از خرده‌فروش $l$
$j \in J$	$hcp_t$	هزینه هر واحد موجودی برای مرکز تولید $j$ در دوره $t$
$k \in K$	$hc_t$	هزینه هر واحد موجودی برای انبار $k$ در دوره $t$
$l \in L$	$hcl_t$	هزینه هر واحد موجودی برای خرده‌فروش $l$ در دوره $t$
$t \in T = \{1, 2, \dots, t\}$	$dc_{ct}$	هزینه انهدام یک واحد محصول $c$ در دوره $t$
$kpr \in KK$	$ic_{ct}$	هزینه بازگشت محصول $c$ از انبار $k$ در دوره $t$
$m \in M$	$tcsp_{ij}$	هزینه حمل‌ونقل به‌ازای انتقال یک واحد محصول از تأمین‌کننده $i$ به مرکز تولید $j$
$n \in N$	$tcsp1_{ij}$	میزان آلودگی هوا به‌ازای انتقال یک واحد محصول از تأمین‌کننده $i$ به مرکز تولید $j$
$r \in R$	$tcsp_{kl}$	هزینه حمل‌ونقل به‌ازای انتقال یک واحد محصول از انبار $k$ به خرده‌فروش $l$
پارامترها:		
$pc_{ct}$		هزینه تولید هر واحد محصول توسط تولیدکننده $j$

دوره t	میزان آلودگی هوا به‌ازای انتقال یک واحد محصول از انبار k به خرده‌فروش l	$tcspp1$
مقدار محصول c انتقالی از خرده‌فروش l به مشتری kpr	هزینه حمل‌ونقل به‌ازای انتقال یک واحد محصول از خرده‌فروش l به مشتری kpr	$tcsppk$
در دوره t	میزان آلودگی هوا به‌ازای انتقال یک واحد محصول از خرده‌فروش l به مشتری kpr	$tcsppk$
مقدار محصول c انتقالی از انبار k به مرکز تولید j در دوره t	هزینه حمل‌ونقل به‌ازای انتقال یک واحد محصول از تولیدکننده j به انبار k	$tcpw_{jk}$
مقدار محصول c انتقالی از انبار k به مرکز تولید j در دوره t	میزان آلودگی هوا به‌ازای انتقال یک واحد محصول از تولیدکننده j به انبار k	$tcpw1_j$
متغیر باینری:	هزینه حمل‌ونقل به‌ازای انتقال یک واحد محصول از تولیدکننده j به مرکز انهدام m	$tcpd_{jm}$
• اگر تأمین‌کننده i انتخاب شود ۱ و در غیر این صورت ۰	میزان آلودگی هوا به‌ازای انتقال یک واحد محصول از تولیدکننده j به مرکز انهدام m	$tcpd1_{ji}$
• اگر مرکز انهدام m انتخاب شود ۱ و در غیر این صورت ۰	هزینه حمل‌ونقل به‌ازای انتقال یک واحد محصول از تولیدکننده j به مرکز باز یافت n	$tcpdd_j$
• اگر مرکز باز یافت n انتخاب شود ۱ و در غیر این صورت ۰	میزان آلودگی هوا به‌ازای انتقال یک واحد محصول از تولیدکننده j به مرکز باز یافت n	$tcpdd1$
• اگر انبار k انتخاب شود ۱ و در غیر این صورت ۰	ظرفیت تولیدکننده i در دوره t	$caps_{it}$
• اگر از k به l محصول رود ۱ و در غیر این صورت صفر	ظرفیت تولیدکننده j	$cap_j$
• اگر از i به j محصول رود ۱ و در غیر این صورت صفر	ظرفیت مرکز انهدام m	$capd_m$
	ظرفیت مرکز باز یافت n	$capr_n$
	ظرفیت انبار k	$capw_k$
	تقاضا مشتری kpr	$dpr_{kpr}$
	تقاضا خرده‌فروش l در دوره t	$d_{lt}$
	قیمت محصول c در دوره t	$rv_{ct}$
	قیمت محصول c در دوره t	$rv1_{ct}$
	درآمد حاصل از باز یافت محصول c در دوره t	$rvr_{ct}$
	عدد بزرگ	$mm$
	هزینه ثابت احداث تأمین‌کننده i	$fs_i$
	هزینه ثابت احداث مرکز انهدام m	$fd_m$
	هزینه ثابت احداث مرکز باز یافت n	$fr_n$
	هزینه ثابت احداث انبار k	$fw_k$
	متغیرهای تصمیم:	
	مقدار محصول نگهداری شده در مرکز تولید j در دوره t	$sp_{jt}$
	مقدار محصول نگهداری شده در خرده‌فروش l در دوره t	$sl_{lt}$
	مقدار محصول نگهداری شده در انبار k در دوره t	$sk_t$
	مقدار محصول r انتقالی از مرکز تأمین i به مرکز تولید j در دوره t	$x_{ijrt}$
	مقدار محصول c انتقالی از مرکز تولید j به انبار k در دوره t	$y_{jkct}$
	مقدار محصول c انتقالی از مرکز تولید j به مرکز انهدام m در دوره t	$rd_{jmct}$
	مقدار محصول c انتقالی از مرکز تولید j به مرکز باز یافت n در دوره t	$rr_{jnct}$
	مقدار محصول c انتقالی از انبار k به خرده‌فروش l در دوره t	$z_{klct}$

$z1 = \max(\text{سود}) = \max(\text{فروش} - \text{هزینه})$

$$\begin{aligned} \text{فروش} = & \sum_t \sum_l \sum_k \sum_c rv_{ct} \times z_{klct} \\ & + \sum_t \sum_j \sum_n \sum_c rvr_{ct} \times rr_{jnct} \\ & + \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c rv1_{ct} \times zpr_{l kpr c t} \\ \text{costs} = & \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r bc_{rt} \times x_{ijrt} \\ & + \sum_t \sum_l \sum_k \sum_c bcc_{ct} \times rz_{lkct} \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} hcp_t \times sp_{jt} \\ & + \sum_l \sum_{t \in T} hcl_t \times sl_{lt} + \sum_k \sum_{t \in T} hc_t \times sk_t \\ & + \sum_t \sum_j \sum_k \sum_c pc_{ct} \times y_{jkct} \\ & + \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r tcsp_{ij} \times x_{ijrt} + \end{aligned}$$

$z2 = \min(\text{آلودگی هوا})$

$$\begin{aligned} = & \min \left( \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r tcsp1_{ij} \times x_{ijrt} \right. \\ & + \sum_{c \in C} \sum_j \sum_{t \in T} \sum_k tcpw1_{jk} \\ & \times (ry_{kjct} + y_{jkct}) \\ & + \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c tcpd1_{jm} \times rd_{jmct} \\ & + \sum_t \sum_k \sum_l \sum_c tcspp1_{kl} \times (z_{klct} \\ & + rz_{lkct}) \\ & + \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c tcsppkpr1_{l kpr} \\ & \times zpr_{l kpr c t} \\ & + \sum_t \sum_n \sum_j \sum_c tcpdd1_{jn} \times rr_{jnct} \\ & + \sum_{c \in C} \sum_j \sum_{t \in T} \sum_k tcpw_{jk} \\ & \left. \times (ry_{kjct} + y_{jkct}) \right) \end{aligned}$$

این محدودیت، موجودی در مراکز تولید را نشان می‌دهد.

$$\sum_m \sum_c rd_{jmct} = 0.5 \times \sum_k \sum_c ry_{kjct} \quad \forall j, t \quad (8)$$

این محدودیت بیان می‌کند که نصف محصول بازگشتی، منهدم می‌شود.

$$s_{kt} = s_{k(t-1)} + \sum_j \sum_c y_{jkct} - \sum_l \sum_c z_{klct} + \sum_l \sum_c rz_{lkct} - \sum_j \sum_c ry_{kjct} \quad \forall k, t \in T \quad (9)$$

این محدودیت، موجودی در انبار را نشان می‌دهد.

$$\sum_j \sum_c y_{jkct} \geq \sum_l \sum_c z_{klct} + \sum_j \sum_c ry_{kjct} - \sum_l \sum_c rz_{lkct} \quad \forall k, t \in T \quad (10)$$

این محدودیت، تعادل جریان در انبار را نشان می‌دهد.

$$\sum_i \sum_r x_{ijrt} \geq \sum_k \sum_c y_{jkct} + \sum_m \sum_c rd_{jmct} - \sum_n \sum_c rr_{jnct} - \sum_k \sum_c ry_{kjct} \quad \forall j, t \in T \quad (11)$$

این محدودیت، تعادل جریان در مراکز تولید را نشان می‌دهد.

$$\sum_r \sum_t x_{ijrt} \leq so_{ij} \times mm \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$\sum_i so_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (13)$$

این محدودیت‌ها بیان می‌کنند که اگر ارسال محصول از  $i$  به  $j$  صورت گیرد، به‌ازای هر تولیدکننده  $j$ ، از یک تأمین‌کننده  $i$  محصول دریافت می‌شود.

$$\sum_c \sum_t z_{klct} \leq sc_{kl} \times mm \quad \forall k, l \quad (14)$$

$$\sum_l sc_{kl} = 1 \quad \forall k \quad (15)$$

این محدودیت‌ها بیان می‌کنند که اگر ارسال محصول از  $k$  به  $l$  صورت گیرد، به‌ازای هر انبار  $k$ ، محصول به یک خرده‌فروش  $l$  ارسال می‌شود.

$$\sum_c \sum_k z_{klct} \leq d_{lt} \quad \forall l, t \quad (16)$$

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار محصول ارسالی از  $k$  به  $l$  از تقاضا  $d_{lt}$  کمتر است.

$$sp_{jt} \leq cap(j) \quad \forall j, t \quad (17)$$

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار موجودی در مرکز تولید  $j$  از ظرفیت آن، کمتر است.

$$s_{kt} \leq capw(k) \quad \forall k, t \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & + \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c tcpd_{jm} \times rd_{jmct} \\ & + \sum_t \sum_k \sum_l \sum_c [(tcspp_{kl} \times (z)_{klct} + rz_{lkct}) \\ & + \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c tcspp_{kpr} \times zpr_{lkprct} \\ & + \sum_t \sum_n \sum_j \sum_c tcpd_{jn} \times rr_{jnct} \\ & + \sum_t \sum_k \sum_j \sum_c ry_{kjct} \times ic_{ct} \\ & + \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c rd_{jmct} \times dc_{ct} \\ & + \sum_i f_{si} \sum_m fd_m \times sd_m + \sum_n fr_n \times sr_n \\ & + \sum_k fw_k \times sw_k \end{aligned}$$

محدودیت‌های مسأله:

$$\sum_{j \in J} \sum_r x_{ijrt} \leq ss_i \times caps_{it} \quad \forall i, t \quad (1)$$

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار محصول ارسالی از  $i$  به  $j$  در صورتی که  $i$  تاسیس شده باشد، از ظرفیت  $i$  کمتر است.

$$\sum_n \sum_c rr_{jnct} = 0.5 \times \sum_k \sum_c ry_{kjct} \quad \forall j, t \quad (2)$$

این محدودیت بیان می‌کند که نصف محصول بازگشتی، بازیافت می‌شود.

$$\sum_k \sum_c y_{jkct} \leq cap_j \quad \forall j, t \quad (3)$$

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار محصول ارسالی از  $j$  به  $k$ ، از ظرفیت  $j$ ، کمتر است.

$$\sum_j \sum_c rd_{jmct} \leq capd_m \times sd_m \quad \forall m, t \quad (4)$$

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار محصول ارسالی از  $j$  به  $m$ ، از ظرفیت  $m$ ، در صورتی که  $m$  تاسیس شده باشد، کمتر است.

$$\sum_j \sum_c rr_{jnct} \leq capr_n \times sr_n \quad \forall n, t \quad (5)$$

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار محصول ارسالی از  $j$  به  $n$ ، از ظرفیت  $n$ ، در صورتی که  $n$  تاسیس شده باشد، کمتر است.

$$\sum_j \sum_c y_{jkct} \leq capw_k \times sw_k \quad \forall k, t \quad (6)$$

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار محصول ارسالی از  $j$  به  $k$ ، از ظرفیت  $k$ ، در صورتی که  $k$  تاسیس شده باشد، کمتر است.

$$sp_{jt} = sp_{j(t-1)} + \sum_i \sum_r x_{ijrt} - \sum_{k \in K} \sum_c y_{jkct} + \sum_k \sum_c ry_{kjct} - \sum_m \sum_c rd_{jmct} - \sum_n \sum_c rr_{jnct} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (7)$$

مرکز تولید  $j$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$   
 مقدار محصول  $C$  انتقالی از مرکز تولید  $j$  به انبار  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$   
 مقدار محصول  $C$  انتقالی از مرکز تولید  $j$  به مرکز انهدام  $m$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$   
 مقدار محصول  $C$  انتقالی از مرکز تولید  $j$  به مرکز بازیافت  $n$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$   
 مقدار محصول  $C$  انتقالی از انبار  $k$  به خرده‌فروش  $l$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$   
 مقدار محصول  $C$  انتقالی از خرده‌فروش  $l$  به مشتری  $kpr$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$   
 مقدار محصول  $C$  انتقالی از خرده‌فروش  $l$  به انبار  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$   
 مقدار محصول  $C$  انتقالی از انبار  $k$  به مرکز تولید  $j$  در دوره  $t$  تحت سناریو  $S$   
 متغیر خطی‌سازی تابع هدف اول  
 متغیر خطی‌سازی تابع هدف دوم

$$y_{jkcts}$$

$$rd_{jmcts}$$

$$rr_{jncts}$$

$$z_{klcts}$$

$$zpr_{lkprcts}$$

$$rz_{lkcts}$$

$$ry_{kjcts}$$

$$\theta_{1s}$$

$$\theta_{2s}$$

متغیرهای باینری تحت سناریو مدل:

اگر تأمین‌کننده  $i$  انتخاب شود  $1$  و در غیر این صورت  $0$ ،  
 تحت سناریو  $S$   $SS_{is}$   
 اگر مرکز انهدام  $m$  انتخاب شود  $1$  و در غیر این صورت  $0$ ،  
 تحت سناریو  $S$   $sd_{ms}$   
 اگر مرکز بازیافت  $n$  انتخاب شود  $1$  و در غیر این صورت  $0$ ،  
 تحت سناریو  $S$   $sr_{ns}$   
 اگر انبار  $k$  انتخاب شود  $1$  و در غیر این صورت  $0$ ،  
 تحت سناریو  $S$   $sw_{ks}$   
 اگر از  $k$  به  $l$  محصول رود  $1$  و در غیر این صورت صفر،  
 تحت سناریو  $S$   $sc_{kls}$   
 اگر از  $i$  به  $j$  محصول رود  $1$  و در غیر این صورت صفر،  
 تحت سناریو  $S$   $so_{ijs}$

بنابراین مدل استوار به صورت زیر می‌باشد:

$$\max z1 = \sum_{s \in S} p_s \left\{ \sum_t \sum_l \sum_k \sum_c rv_{cs} \times z_{klcts} + \sum_t \sum_j \sum_n \sum_c rvr_{cs} \times rr_{jncts} + \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c rv1_{cs} \times zpr_{lkprcts} - \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r bc_{rs} \times x_{ijrts} - \sum_t \sum_l \sum_k \sum_c bcc_{cs} \times rz_{lkcts} - \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} hcp_t \times sp_{jt} - \sum_l \sum_{t \in T} hcl_t \times sl_{lt} - \sum_k \sum_{t \in T} hc_t \times s_{kt} - \sum_t \sum_j \sum_k \sum_c pc_{cs} \times y_{jkcts} - \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r tcsp_{ij} \times x_{ijrts} - \right.$$

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار موجودی در انبار  $k$ ، از ظرفیت آن، کمتر است.

$$\sum_l \sum_c zpr_{lkprcts} \leq dpr_{kpr} \quad \forall kpr, t \quad (19)$$

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار محصول ارسالی از  $l$  به  $kpr$  از تقاضا  $kpr$ ، کمتر است.

$$\sum_k \sum_c z_{klcts} \geq \sum_{kpr} \sum_c zpr_{lkprcts} + \sum_k \sum_c rz_{lkcts} \quad \forall l, t \quad (20)$$

این محدودیت، تعادل جریان در خرده‌فروش‌ها را نشان می‌دهد.

$$sl_{lt} = sl_{lt-1} + \sum_k \sum_c z_{klcts} - \sum_{kpr} \sum_c zpr_{lkprcts} - \sum_k \sum_c rz_{lkcts} \quad \forall l, t \quad (21)$$

این محدودیت، موجودی در خرده‌فروش‌ها را نشان می‌دهد.

$$sl_{lt} \leq d_{lt} \quad \forall l, t \quad (22)$$

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار موجودی در خرده‌فروش  $l$  از تقاضا آن، کمتر است.

$$ry_{kjct} \cdot rr_{jnct} \cdot x_{ijrt} \cdot y_{jkct} \cdot sp_{jt} \cdot s_{kt} \cdot z_{klct} \cdot zpr_{lkprct} \cdot rz_{lkct} \cdot sl_{lt} \geq 0$$

پارامتر تقاضا برای مشتری و خرده‌فروش و پارامتر ظرفیت برای مراکز بازیافت، انهدام، تأمین، تولید و انبار در نظر گرفته شد. پارامترها طوری مقداردهی شدند که مدل شدنی باشد و همچنین تقاضا برآورده شود. جریان محصول در شبکه زنجیره‌تأمین با محدودیت‌های (۱۰)، (۱۱) و (۲۰) برقرار شد. ارتباط بین دوره‌های مختلف مسأله از بامحدودیت‌های موجودی (۷)، (۹) و (۲۱) برقرار شد.

### ۲-۳. مدل بهینه‌سازی استوار

مدل‌سازی در حالت عدم قطعیت:

در این قسمت جهت رویارویی با عدم قطعیت از بهینه‌سازی استوار با رویکرد مالوی استفاده می‌شود. ابتدا یک اندیس جدید  $S$  به‌عنوان تعداد سناریو به مجموعه اندیس‌ها اضافه می‌شود. سپس پارامترها و متغیرهای جدید، متناسب برای سناریوهای مختلف قرار داده می‌شوند. در اینجا چهار سناریوی مختلف ( $S=1,2,\dots,S$ ) با احتمال‌های برابر در نظر گرفته شده است.

پارامترهای تحت سناریو مدل:

$p_s$	احتمال رخداد سناریو $s$
$rv_c^s$	قیمت محصول $C$ تحت سناریو $S$
$rv1_c^s$	قیمت محصول $C$ تحت سناریو $S$
$rvr_c^s$	درآمد حاصل از بازیافت محصول $C$ تحت سناریو $S$
$pc_c^s$	هزینه تولید هر واحد محصول $C$ تحت سناریو $S$
$bc_r^s$	هزینه تأمین هر واحد محصول $C$ تحت سناریو $S$
$bcc_c^s$	هزینه بازگشت محصول $C$ تحت سناریو $S$
$dc_c^s$	هزینه انهدام محصول $C$ تحت سناریو $S$
$ic_c^s$	هزینه بازگشت محصول $C$ از انبار $k$ تحت سناریو $S$

متغیرهای تحت سناریو مدل:

$x_{ijrts}$  مقدار محصول  $r$  انتقالی از مرکز تأمین  $i$  به

$$\} - \sum_{s' \in S} p_{s'} \left\{ \sum_t \sum_l \sum_k \sum_c rv_{cs'} \times z_{klcts'} \right. \\ + \sum_t \sum_j \sum_n \sum_c rvr_{cs'} \times rr_{jncts'} \\ \left. + \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c rv1_{cs'} \times zpr_{lkprct s'} - \right.$$

$$\sum_t \sum_j \sum_i \sum_r bc_{rs'} \times x_{ijrts'} \\ - \sum_t \sum_l \sum_k \sum_c bcc_{cs'} \times rz_{lkcts'} \\ - \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} hcp_t \times sp_{jt} \\ - \sum_l \sum_{t \in T} hcl_t \times sl_{lt} - \sum_k \sum_{t \in T} hc_t \times s_{kt} \\ - \sum_t \sum_j \sum_k \sum_c pc_{cs'} \times y_{jkcts'} \\ - \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r tcsp_{ij} \times x_{ijrts'} \\ - \sum_{c \in C} \sum_j \sum_{t \in T} \sum_k tcpw_{jk} \\ \times (ry_{kjcts'} + y_{jkcts'}) \\ - \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c tcpd_{jm} \times rd_{jmcts'} \\ - \sum_t \sum_k \sum_l \sum_c tcsp_{kl} \times (z_{klcts'} \\ + rz_{lkcts'}) \\ - \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c tcsp_{pkpr}_{lkpr} \\ \times zpr_{lkprct s'} \\ - \sum_t \sum_n \sum_j \sum_c tcpdd_{jn} \times rr_{jncts'} \\ - \sum_t \sum_k \sum_j \sum_c ry_{kjcts'} \times ic_{cs'} \\ - \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c rd_{jmcts'} \times dc_{cs'} \\ - \sum_i fs_i \times ss_{is'} - \sum_m fd_m \times sd_{ms'} \\ - \sum_n fr_n \times sr_{ns'} - \sum_k fw_k \times sw_{ks'} \\ \left. \right\} + 2\theta_{1s}] - w \times \sum_{s \in S} p_s \times \delta(s)$$

$$\min z2 = \sum_{s \in S} P_s \left\{ \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r tcsp_{ij} \times x_{ijrts} \right. \\ + \sum_{c \in C} \sum_j \sum_{t \in T} \sum_k tcpw_{1jk} \\ \times (ry_{kjcts} + y_{jkcts}) \\ + \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c tcpd_{1jm} \times rd_{jmcts} \\ + \sum_t \sum_k \sum_l \sum_c tcsp_{1kl} \times (z_{klcts} \\ + rz_{lkcts}) \\ + \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c tcsp_{pkpr}_{1lkpr} \\ \times zpr_{lkprct s} \\ \left. + \sum_t \sum_n \sum_j \sum_c tcpdd_{1jn} \times rr_{jncts} \right\}$$

$$\sum_{c \in C} \sum_j \sum_{t \in T} \sum_k tcpw_{jk} \times (ry_{kjcts} + y_{jkcts}) \\ - \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c tcpd_{jm} \times rd_{jmcts} \\ - \sum_t \sum_k \sum_l \sum_c tcsp_{kl} \times (z_{klcts} \\ + rz_{lkcts}) \\ - \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c tcsp_{pkpr}_{lkpr} \\ \times zpr_{lkprct s} \\ - \sum_t \sum_n \sum_j \sum_c tcpdd_{jn} \times rr_{jncts} \\ - \sum_t \sum_k \sum_j \sum_c ry_{kjcts} \times ic_{cs} \\ - \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c rd_{jmcts} \times dc_{cs} - \sum_i fs_i \\ \times ss_{is} - \sum_m fd_m \times sd_{ms} - \sum_n fr_n \times sr_{ns} \\ - \sum_k fw_k \times sw_{ks} \\ \left. \right\} + \lambda \times \sum_{s \in S} p_s \left\{ \sum_t \sum_l \sum_k \sum_c rv_{cs} \times z_{klcts} \right. \\ + \sum_t \sum_j \sum_n \sum_c rvr_{cs} \times rr_{jncts} \\ + \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c rv1_{cs} \times zpr_{lkprct s} - \\ \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r bc_{rs} \times x_{ijrts} - \sum_t \sum_l \sum_k \sum_c bcc_{cs} \times rz_{lkcts} \\ - \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} hcp_t \times sp_{jt} \\ - \sum_l \sum_{t \in T} hcl_t \times sl_{lt} - \sum_k \sum_{t \in T} hc_t \times s_{kt} \\ - \sum_t \sum_j \sum_k \sum_c pc_{cs} \times y_{jkcts} \\ - \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r tcsp_{ij} \times x_{ijrts} \\ - \sum_{c \in C} \sum_j \sum_{t \in T} \sum_k tcpw_{jk} \\ \times (ry_{kjcts} + y_{jkcts}) \\ - \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c tcpd_{jm} \times rd_{jmcts} \\ - \sum_t \sum_k \sum_l \sum_c tcsp_{kl} \times (z_{klcts} \\ + rz_{lkcts}) \\ - \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c tcsp_{pkpr}_{lkpr} \\ \times zpr_{lkprct s} \\ - \sum_t \sum_n \sum_j \sum_c tcpdd_{jn} \times rr_{jncts} \\ - \sum_t \sum_k \sum_j \sum_c ry_{kjcts} \times ic_{cs} \\ - \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c rd_{jmcts} \times dc_{cs} - \sum_i fs_i \\ \times ss_{is} - \sum_m fd_m \times sd_{ms} - \sum_n fr_n \times sr_{ns} \\ - \sum_k fw_k \times sw_{ks} \\ \left. \right\}$$

$$\sum_m \sum_c rd_{jmcts} = 0.5 \times \sum_k \sum_c ry_{kjcts} \quad \forall j.t \in T.s \quad (30)$$

$$s_{kt} = s_{k(t-1)} + \sum_j \sum_c y_{jkcts} - \sum_l \sum_c z_{klcts} + \sum_l \sum_c rz_{lkcts} - \sum_j \sum_c ry_{kjcts} \quad \forall k.t \in T.s \quad (31)$$

$$\sum_j \sum_c y_{jkcts} \geq \sum_l \sum_c z_{klcts} + \sum_j \sum_c ry_{kjcts} - \sum_l \sum_c rz_{lkcts} \quad \forall k.t \in T.s \quad (32)$$

$$\sum_i \sum_r x_{ijrts} \geq \sum_k \sum_c y_{jkcts} + \sum_m \sum_c rd_{jmcts} - \sum_n \sum_c rr_{jncts} - \sum_k \sum_c ry_{kjcts} \quad \forall j.t \in T.s \quad (33)$$

$$\sum_r \sum_t x_{ijrts} \leq s_{oij} \times mm \quad \forall i.j.s \quad (34)$$

$$\sum_i s_{oij} = 1 \quad \forall j.s \quad (35)$$

$$\sum_c \sum_t z_{klcts} \leq s_{ckls} \times mm \quad \forall k.l.s \quad (36)$$

$$\sum_l s_{ckls} = 1 \quad \forall k.s \quad (37)$$

$$\sum_c \sum_k z_{klcts} \leq d_{lt} \quad \forall l.t.s \quad (38)$$

$$sp_{jt} \leq cap(j) \quad \forall j.t \quad (39)$$

$$s_{kt} \leq capw(k) \quad \forall k.t \quad (40)$$

$$\sum_l \sum_c zpr_{lkprcts} \leq dpr_{kpr} \quad \forall kpr.t.s \quad (41)$$

$$\sum_k \sum_c z_{klcts} \geq \sum_{kpr} \sum_c zpr_{lkprcts} + \sum_k \sum_c rz_{lkcts} \quad \forall l.t.s \quad (42)$$

$$sl_{lt} = sl_{l(t-1)} + \sum_k \sum_c z_{klcts} - \sum_{kpr} \sum_c zpr_{lkprcts} - \sum_k \sum_c rz_{lkcts} \quad \forall l.t.s \quad (43)$$

$$sl_{lt} \leq d_{lt} \quad \forall l.t \quad (44)$$

$$ry_{kjcts} \cdot rr_{jncts} \cdot x_{ijrts} \cdot y_{jkcts} \cdot sp_{jt} \cdot s_{kt} \cdot z_{klcts} \cdot zpr_{lkprcts} \cdot rz_{lkcts} \cdot sl_{lt} \geq 0$$

#### ۴. رویکردهای حل مسأله

به‌طور کلی روش‌های حل مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی به‌دسته روش‌های دقیق و روش‌های تقریبی (غیردقیق) تقسیم می‌شوند.

$$+\lambda \times \sum_{s \in S} P_s \left\{ \left( \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r tcsp1_{ij} \times x_{ijrts} + \sum_{c \in C} \sum_j \sum_{t \in T} \sum_k tcpw1_{jk} \times (ry_{kjcts} + y_{jkcts}) + \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c tcpd1_{jm} \times rd_{jmcts} + \sum_t \sum_k \sum_l \sum_c tcspp1_{kl} \times (z_{klcts} + rz_{lkcts}) + \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c tcsppkpr1_{lkpr} \times zpr_{lkprcts} + \sum_t \sum_n \sum_j \sum_c tcpdd1_{jn} \times rr_{jncts} \right) - \sum_{s \in S'} P_{s'} \left\{ \left( \sum_t \sum_j \sum_i \sum_r tcsp1_{ij} \times x_{ijrts}' + \sum_{c \in C} \sum_j \sum_{t \in T} \sum_k tcpw1_{jk} \times (ry_{kjcts}' + y_{jkcts}') + \sum_t \sum_m \sum_j \sum_c tcpd1_{jm} \times rd_{jmcts}' + \sum_t \sum_k \sum_l \sum_c tcspp1_{kl} \times (z_{klcts}' + rz_{lkcts}') + \sum_t \sum_l \sum_{kpr} \sum_c tcsppkpr1_{lkpr} \times zpr_{lkprcts}' + \sum_t \sum_n \sum_j \sum_c tcpdd1_{jn} \times rr_{jncts}' \right) \right\} - w \times \sum_{s \in S} p_s \times \delta(s) \right\}$$

محدودیت‌های مسأله:

$$\sum_{j \in J} \sum_r x_{ijrts} \leq ss_{is} \times caps_{it} \quad \forall i.t.s \quad (23)$$

$$\sum_n \sum_c rr_{jncts} = 0.5 \times \sum_k \sum_c ry_{kjcts} \quad \forall j.t.s \quad (24)$$

$$\sum_k \sum_c y_{jkcts} \leq cap_j \quad \forall j.t.s \quad (25)$$

$$\sum_j \sum_c rd_{jmcts} \leq capd_m \times sd_{ms} \quad \forall m.t.s \quad (26)$$

$$\sum_j \sum_c rr_{jncts} \leq capr_n \times sr_{ns} \quad \forall n.t.s \quad (27)$$

$$\sum_j \sum_c y_{jkcts} \leq capw_k \times sw_{ks} \quad \forall k.t.s \quad (28)$$

$$sp_{jt} = sp_{j(t-1)} + \sum_i \sum_r x_{ijrts} - \sum_m \sum_c rd_{jmcts} - \sum_n \sum_c rr_{jncts} \quad (29)$$

$$-\sum_{k \in K} \sum_c y_{jkcts} + \sum_k \sum_c ry_{kjcts} \quad (29)$$



جدول (۱): نتایج حل دقیق مدل قطعی

	مدل قطعی (روش اپسیلون محدودیت)
1	تابع هدف اول ۱۶۲۲۸۰
	تابع هدف دوم ۱۰۲۳
2	تابع هدف اول ۲۴۳۰۱۶
	تابع هدف دوم ۱۳۳۱
3	تابع هدف اول ۳۲۶۱۴۲
	تابع هدف دوم ۱۲۹۸

با مقایسه نتایج روش اپسیلون محدودیت در مدل استوار و مدل قطعی متوجه می‌شویم که تابع هدف اول در سه مسأله در مدل قطعی بیشتر از مدل استوار است. به دلیل اینکه تابع هدف اول ماکزیمم‌سازی سود است بنابراین بیشتر بودن آن به معنای بهتر بودن آن می‌باشد. همچنین تابع هدف دوم در سه مسأله در مدل قطعی کمتر از مدل استوار است. به دلیل اینکه تابع هدف دوم مینیمم‌سازی آلودگی هوا است بنابراین کمتر بودن آن به معنای بهتر بودن آن می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که استوارسازی مسأله باعث بدتر شدن توابع هدف پیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی آلودگی هوا حل می‌شود.

جدول (۲): نتایج حل دقیق مدل استوار

	مدل استوار (روش اپسیلون محدودیت)
1	تابع هدف اول ۱۶۰۸۷۵
	تابع هدف دوم ۱۰۲۳
2	تابع هدف اول ۲۴۱۰۴۹
	تابع هدف دوم ۱۳۶۵
3	تابع هدف اول ۳۲۴۱۴۷
	تابع هدف دوم ۱۳۷۹

#### ۲-۴. رویکرد حل فراابتکاری

در اینجا چند الگوریتم فراابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA-II)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه (MOSA)، برای حل مدل، ارائه می‌شود. برای تأیید عملکرد این الگوریتم‌ها، روش اپسیلون محدودیت، با حل‌کننده سیپلکس<sup>۲</sup> نرم‌افزار گمز<sup>۳</sup> استفاده می‌شود، و تابع هدف اول به‌عنوان هدف اصلی در روش اپسیلون محدودیت در نظر گرفته می‌شود و هدف دیگر به محدودیت تبدیل می‌شود.

#### ۲-۴-۱. شاخص اندازه‌گیری استاندارد چندهدفه

در اینجا، چهار معیار اندازه‌گیری استاندارد چندهدفه شامل NPS، MID، SNS، MS، برای مقایسه الگوریتم‌های به‌کار گرفته شده انتخاب شده‌اند که معیارهای مختلفی را اندازه‌گیری می‌کنند و می‌توان آن‌ها را به شرح زیر فهرست کرد:

روش‌های دقیق جواب بهینه را ارائه می‌کنند اما برای مسائل بزرگ کارایی لازم را ندارند و زمان حل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. روش‌های تقریبی جوابی نزدیک به جواب بهینه را در زمانی مناسب ارائه می‌کنند. به دلیل قدرت بالای این روش‌ها، معمولاً در مسائلی با اندازه بزرگ از آن‌ها استفاده می‌شود. این روش‌ها به دو دسته الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری تقسیم می‌شوند. نکته‌ی قابل توجه در حل الگوریتم‌های ابتکاری این است که ممکن است بهینه‌های محلی را ارائه نمایند؛ در صورتی که الگوریتم‌های فراابتکاری این مشکل را حل نموده‌اند.

برای حل مدل پیشنهادی این پژوهش، از روش اپسیلون محدودیت، که برای حل دقیق مسائل چندهدفه است، استفاده می‌شود. سپس برای حل مسائل در ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA-II)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) و شبیه‌سازی تبرید چندهدفه (MOSA) استفاده می‌شود.

#### ۴-۱. حل دقیق مسأله (روش اپسیلون محدودیت)

روش اپسیلون محدودیت، یکی از روش‌های حل دقیق است که برای مسائل چندهدفه استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا تابع هدف با بیشترین اولویت در نظر گرفته می‌شود، سپس بقیه هدف‌ها به‌صورت محدودیت به سایر محدودیت‌ها اضافه می‌شوند، و با استفاده از روش توضیح داده شده، مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو<sup>۱</sup> تولید می‌شوند. باتوجه به این مطلب مراحل حل به شرح زیر می‌باشد:

- ابتدا مسأله چندهدفه با توابع هدف پیشینه‌سازی را در نظر می‌گیریم. سپس مسأله را با تک‌تک هدف‌ها حل می‌کنیم و به‌ازای هر هدفی که بهینه شده، مقادیر سایر اهداف را به‌دست می‌آوریم.
  - به‌ازای هر تابع هدف فرعی که در محدودیت‌ها قرار می‌گیرد مقدار انحراف را به این صورت تعریف می‌کنیم که بدترین مقدار آن هدف را از بهترین مقدار آن هدف که همان مقدار بهینه‌اش هست، کم می‌کنیم.
  - مقدار به‌دست آمده را در عدد تصادفی بین صفر و یک به تعداد دلخواه (تعداد جواب پارتو مورد نظر) ضرب کرده و از جواب بهینه هدف مربوطه کم می‌کنیم.
  - به این ترتیب یک حد پایین به‌ازای هر تابع هدف فرعی باتوجه به پیشینه بودن توابع هدف به‌دست می‌آید، که به محدودیت‌های دیگر مسأله اضافه می‌شوند. به این ترتیب مسأله جدید با محدودیت‌های اضافه شده و با یک تابع هدف اصلی حل می‌شود، که با تغییر عدد تصادفی بین صفر و یک ضرب شده درگام ۳، مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو به‌دست می‌آید.
- در جدول (۱) نتایج حل دقیق مدل قطعی و در جدول (۲) حل مسأله در حالت عدم قطعیت با استفاده از روش استوار مالوی ارائه می‌شود.

3. GAMS

1. Pareto  
2. CPLEX

عوامل اختلال است. برای انجام این کار، از نسبت سیگنال به نویز برای محاسبه مقدار انحراف پاسخ استفاده می‌شود. سه نوع پاسخ شامل "کوچکتر، بهتر است"، "بزرگتر، بهتر است" و "اسمی، بهتر است" طراحی شده است و در رابطه زیر نشان داده می‌شود، در اینجا نوع پاسخ "کوچکتر، بهتر است" برای تنظیم پارامترهای هر الگوریتم اعمال می‌شود.

$$\frac{S}{N} = -10 \times \log\left(\frac{\sum y^2}{n}\right)$$

در این رابطه،  $Y$  نشان‌دهنده مقدار پاسخ و  $n$  تعداد آرایه‌های متعامد است. در این پژوهش رابطه زیر به‌عنوان متغیر پاسخ است. این متغیر شامل دو جزء اصلی شامل تنوع و همگرایی است و نرخ همگرایی راه‌حل‌ها با مقدار  $MID$  اندازه‌گیری می‌شود و مقدار  $MS$  راه‌حل‌های متنوعی را به‌دست می‌آورد.

$$MCOV = \frac{MID}{MS}$$

اولین مرحله برای انجام تنظیم پارامتر، طبقه‌بندی سطوح پارامتر است. برای این منظور سه سطح برای پارامترهای هر الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تیب<sup>۱</sup>، آرایه‌های متعامد روش تاگوچی به‌دست می‌آید.

برای تنظیم پارامتر، ابتدا مسائل در ابعادی که به روش دقیق بتوان جواب بهینه را پیدا کرد، طراحی شد. باتوجه به اینکه حداقل اختلاف جواب دقیق با جواب الگوریتم فراابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط<sup>۲</sup> موردنظر است، تعداد تکرار، تعداد جمعیت اولیه، نرخ جهش<sup>۳</sup>، نرخ تقاطع<sup>۴</sup> به‌عنوان عوامل آزمون‌ها در نظر گرفته شد و در نهایت با هدف حداقل فاصله با جواب بعینه پارامترهای الگوریتم تنظیم شد.

#### ۴-۲-۳. مفهوم غلبه کردن در الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه

الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه، در واقع همان الگوریتم‌های فراابتکاری تک‌هدفه هستند، با این تفاوت که مفهوم غلبه کردن به آن‌ها اضافه شده است. در مسائل چندهدفه باتوجه به اینکه با حداقل دو هدف سروکار داریم، نمی‌توانیم یک جواب را به‌عنوان جواب بهینه پیدا کنیم. بنابراین در مسائل چندهدفه با مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه روبه‌رو هستیم، که به آن‌ها مجموعه جواب‌های پارتو می‌گوییم. حال می‌توانیم از مجموعه جواب‌های پارتو که همه آن‌ها بهینه هستند، جواب موردنظر خود را انتخاب کنیم. در الگوریتم‌های فراابتکاری جواب‌هایی را در مجموعه جواب‌های پارتو قرار می‌دهیم که بر جواب‌های دیگر غالب شده باشند و جواب‌های دیگر را مغلوب کرده باشند. این عمل را به این‌صورت تعریف می‌کنیم که جوابی بر جواب دیگری غالب می‌شود که در هر هم‌مقیاس مقادیر توابع هدفش از دیگری بهتر یا مساوی باشد و حداقل یک هدف وجود داشته باشد که در آن اکیداً بهتر است. به این‌صورت در هر سه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، شبیه‌سازی تبرید و ژنتیک، این فرآیند را به‌کار می‌گیریم و الگوریتم‌های تک‌هدفه را به الگوریتم‌های چندهدفه تبدیل می‌کنیم.

تعداد راه‌حل پارتو (NPS): برای مشاهده کیفیت راه‌حل یافت شده از NPS استفاده می‌شود. تعداد راه‌حل پارتو به‌دست آمده توسط هر الگوریتم، کیفیت بالای جبهه‌های پارتو آن را نشان می‌دهد. این متریک فرمول ندارد و فقط باید تعداد جواب‌های پارتو به‌دست آمده را با الگوریتم شمارش کرد.

میانگین فاصله ایده‌آل ( $MID$ ): برای اندازه‌گیری نرخ همگرایی الگوریتم‌ها با محاسبه فواصل بین راه‌حل‌های به‌دست آمده، از  $MID$  استفاده می‌شود.  $MID$  نرمال شده در معادله فرموله شده است. تعداد جواب‌های پارتو با  $n$  بیان می‌شود.  $f_{1i}$ ،  $f_{2i}$  به‌ترتیب مقدار توابع هدف اول و دوم را برای جواب پارتو  $i$  نشان می‌دهند. ( $f_{1_{best}}$ ،  $f_{2_{best}}$ ) هدف ایده‌آل را نشان می‌دهد و با  $(0, 1)$  در این مدل نشان داده می‌شود.  $f_{1_{tptal}}^{min}$  و  $f_{1_{tptal}}^{max}$  به‌ترتیب حداقل و حداکثر مقدار تابع هدف اول را در بین تمام جواب‌های پارتو نشان می‌دهد. مقدار کمتر  $MID$  بهتر است.

$MID$

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_{1i} - f_{1_{best}}}{f_{1_{tptal}}^{max} - f_{1_{tptal}}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{f_{2i} - f_{2_{best}}}{f_{2_{tptal}}^{max} - f_{2_{tptal}}^{min}}\right)^2}}{n}$$

گسترش راه‌حل‌های غیرمسلط ( $SNS$ ): این اندازه‌گیری برای بررسی تنوع راه‌حل‌های غیرمسلط، اعمال می‌شود.  $f_{1i}$ ،  $f_{2i}$  به‌ترتیب مقدار توابع هدف اول و دوم را برای راه‌حل غیرمسلط  $i$  نشان می‌دهند. مقدار بالاتر این معیار بهتر است.

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M - C_i)^2}{n-1}}$$

$$C_i = \sqrt{f_{1i}^2 + f_{2i}^2}$$

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}$$

حداکثر گسترش ( $MS$ ): تلاش می‌کند تا گسترش راه‌حل‌های غیرمسلط را نشان دهد، که در آن  $\max f_i$  و  $\min f_i$  به‌ترتیب حداکثر و حداقل مقدار هدف  $i$  را در بین راه‌حل‌های پارتو به‌دست آمده نشان می‌دهند. مقدار بالاتر این معیار بهتر است.

$$MS = \sqrt{\sum_{i=1}^l (\min f_i - \max f_i)^2}$$

#### ۴-۲-۲. تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری

در اینجا برای دستیابی به بهترین عملکرد، هر الگوریتم فراابتکاری، از روش تاگوچی<sup>۱</sup> برای تنظیم پارامترهای هر الگوریتم، استفاده می‌شود [۶]. تاگوچی یک مشاور کیفیت در ژاپن بود که با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از عناصر مبتنی بر آرایه‌های متعامد، برای اجتناب از انجام آزمایش‌های بی‌شمار استفاده کرد. در این روش، عوامل ذکر شده به دو دسته قابل کنترل و اختلال تقسیم می‌شوند، که در تلاش برای به حداکثر رساندن تأثیر عوامل قابل کنترل و به حداقل رساندن تأثیر

## ۳-۴. الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط

الگوریتم بهینه‌سازی GA<sup>۱</sup> سودمندی خود را در طیف گسترده‌ای از مسائل دشوار نشان داده است. در طول سال‌های گذشته، روش‌های رمزگذاری مختلفی برای مسائل خاص ایجاد شده است تا اجرای مؤثر GA را فراهم کند. بازنمایی مبتنی بر درخت، یکی از راه‌های نمایش مسائل شبکه است. اساساً سه راه برای رمزگذاری درخت وجود دارد: (۱) رمزگذاری مبتنی بر یال، (۲) رمزگذاری مبتنی بر رأس و (۳) رمزگذاری مبتنی بر یال و رأس [۷]. مکالویز<sup>۲</sup> اولین محقق بود که از GA برای حل مسائل حمل‌ونقل، استفاده کرد. در رویکرد او، نمایش مبتنی بر ماتریس استفاده شده بود. وقتی  $|K|$  و  $|J|$  به ترتیب تعداد منابع و دیپوها باشند، بعد ماتریس  $|K| \times |J|$  خواهد بود. اگرچه نمایش آن بسیار ساده است، اما برای دستیابی به راه‌حل‌های شذنی، نیاز به عملگرهای متقاطع و جهش خاص وجود دارد.

استفاده از درخت پوشا GA برای حل برخی از مشکلات شبکه توسط جن<sup>۳</sup> معرفی شد. آن‌ها از عدد‌های خاصی به منظور نشان دادن راه‌حل برای مسائل استفاده کردند و معیارهای شذنی بودن را برای اعداد ایجاد کردند تا یک درخت پوشا رمزگشایی شود. آن‌ها خاطر نشان کردند که استفاده از این اعداد برای رمزگذاری درخت پوشا، به‌ویژه در برخی زمینه‌های تحقیقاتی مانند مسائل حمل‌ونقل بسیار مناسب است. برای نمایش منحصربه‌فرد یک شبکه توزیع با  $|K|$  منبع و  $|J|$  انبار، از اعداد صحیح بین ۱ و  $|K|+|J|$  استفاده شده است. از آنجایی که درخت حمل‌ونقل نوع خاصی از درخت پوشا است، رمزگذاری عدد ممکن است با یک راه‌حل نشذنی مطابقت داشته باشد، یعنی درخت حمل‌ونقل را نشان نمی‌دهد. از این جهت، نیاز به طراحی معیاری برای بررسی شذنی بودن کروموزوم‌ها وجود دارد. یکی از این معیارها این است که اعداد تکراری ظاهر نشوند. همچنین هنگامی که جریان برقرار می‌شود عدد مربوط به آن منبعی که ظرفیت آن صفر شده است، صفر می‌شود تا آن منبع دوباره انتخاب نشود. برای یک مسأله حمل‌ونقل، طول کروموزوم برابر است با تعداد کل منابع  $(|K|)$  و انبارها  $(|J|)$ ، یعنی  $|K|+|J|$ . درخت حمل‌ونقل مربوط به یک کروموزوم داده شده توسط قوس متوالی بین منابع و انبارها ایجاد می‌شود. در هر مرحله، تنها یک قوس به درخت اضافه می‌شود ابتدا منبع (مخزن) با بالاترین اولویت انتخاب و با در نظر گرفتن حداقل هزینه به یک انبار (منبع) متصل می‌شود. بنابراین در اولین مرحله از فرآیند رمزگشایی، یک قوس بین انباری که دارای بیشترین اولویت است و منبعی که دارای کمترین هزینه در درخت حمل‌ونقل است، به درخت حمل‌ونقل اضافه می‌شود. پس از تعیین مقدار محموله که کمترین مقدار بین ظرفیت منبع و تقاضای انبار است، ظرفیت منبع و تقاضای انبار به ترتیب با کسر مقدار به دست آمده به‌روزرسانی می‌شوند. به‌همین ترتیب منبع با بالاترین اولویت بعدی انتخاب می‌شود و پس از افزودن قوس بین انبار و منبع، میزان محموله بین آن‌ها مشخص شده و ظرفیت و تقاضای آن‌ها همان‌طور

که در بالا توضیح داده شد به‌روزرسانی می‌شود و این روند تا برآورده شدن مطالبات همه انبارها تکرار می‌شود.

بدیهی است که هر درخت حمل‌ونقل را می‌توان با این طرح نمایش کدگذاری کرد و هر کدگذاری نشان‌دهنده یک درخت پوشا است. با این روش می‌توان همه درختان حمل‌ونقل ممکن را نشان داد. ما از هشت رمزگذاری مبتنی بر اولویت برای نشان دادن درختان انتقال استفاده می‌کنیم. این بدان معناست که هر کروموزوم در جمعیت از هشت قسمت تشکیل شده است. که قسمت اول (یعنی کدگذاری مبتنی بر اولویت اول) درخت حمل‌ونقل بین مراکز تأمین و تولید را نشان می‌دهد. قسمت دوم (یعنی کدگذاری مبتنی بر اولویت دوم) درخت حمل‌ونقل بین مراکز تولید و انبار را نشان می‌دهد. قسمت سوم (یعنی کدگذاری مبتنی بر اولویت سوم) درخت حمل‌ونقل بین انبار و خرده‌فروش را نشان می‌دهد. قسمت چهارم (یعنی کدگذاری مبتنی بر اولویت چهارم) درخت حمل‌ونقل بین خرده‌فروش و مشتری را نشان می‌دهد. قسمت پنجم (یعنی کدگذاری مبتنی بر اولویت پنجم) درخت حمل‌ونقل بین خرده‌فروش و انبار را نشان می‌دهد. قسمت ششم (یعنی کدگذاری مبتنی بر اولویت ششم) درخت حمل‌ونقل بین انبار و مراکز تولید را نشان می‌دهد. قسمت هفتم (یعنی کدگذاری مبتنی بر اولویت هفتم) درخت حمل‌ونقل بین مراکز تولید و انهدام را نشان می‌دهد. قسمت هشتم (یعنی کدگذاری مبتنی بر اولویت هشتم) درخت حمل‌ونقل بین مراکز تولید و باز یافت را نشان می‌دهد. همچنین، می‌توان به‌منظور برآورد تقاضای مشتریان، مجموع مقادیر تولید را بیشتر از مجموع مقادیر تقاضا در نظر گرفت. در این روش برای برآورده کردن محدودیت تعادل جریان بین سطح اول زنجیره‌تأمین و سطح دوم آن، ابتدا با استفاده از کدگذاری مبتنی بر اولویت اول مقدار جریان برقرار شده را به‌دست می‌آوریم. سپس آن‌را به‌عنوان منبع برای کدگذاری مبتنی بر اولویت دوم در نظر می‌گیریم. به این ترتیب مجموع جریان‌هایی که از مراکز تولید به انبار می‌روند از مقدار جریان برقرار شده بین مراکز تأمین و تولید بیشتر نمی‌شود. به‌همین ترتیب محدودیت تعادل جریان بین دوسطح زنجیره‌تأمین برقرار می‌شود. همچنین برای برآورده کردن محدودیت موجودی، ابتدا جریانی که بین مراکز تأمین و تولید برقرار می‌شود (یعنی کدگذاری مبتنی بر اولویت اول) را با متغیر موجودی انبار که در ابتدا دارای مقدار صفر است جمع می‌کنیم، و آن‌را به‌عنوان منبع برای مراکز تولید قرار می‌دهیم. در این هنگام وقتی جریان بین مراکز تولید و انبار برقرار شد (یعنی کدگذاری مبتنی بر اولویت دوم)، باقی‌مانده آن‌را در متغیر موجودی می‌ریزیم. به این ترتیب محدودیت موجودی در هر دوره برقرار و به‌روزرسانی می‌شود. روند توضیح داده شده محدودیت تعادل جریان و محدودیت موجودی، برای همه کدگذاری‌های مبتنی بر اولویت اول تا هشتم برقرار است.

الگوریتم مبتنی بر اولویت استفاده شده برای مدل قطعی در شکل

می‌کنیم. اگر برای سطوحی باشد که در آن‌ها هر مبدا به یک مقصد و یا بالعکس محصول میفرستد از متغیر باینری  $U_{ij}$  استفاده می‌کنیم و محدودیت مربوط به آن را از روش جریمه (تخطی از محدودیت با ضریب جریمه، با تابع هدف جمع می‌شود)، برقرار می‌کنیم.

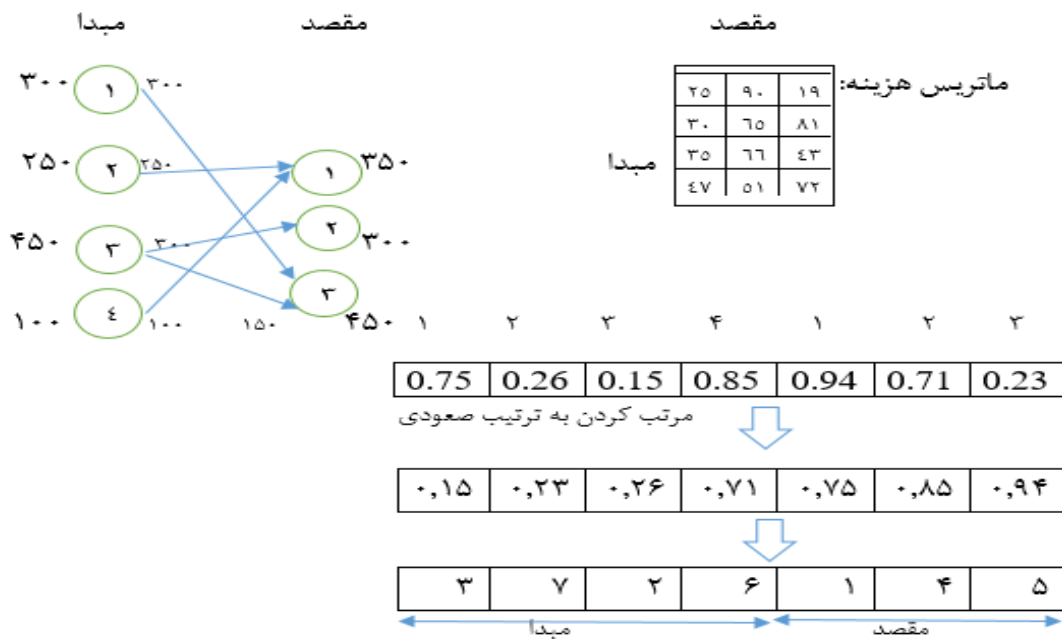
(۳) آمده است. باتوجه به اینکه الگوریتم مبتنی بر اولویت را برای سطوح مختلف زنجیره تأمین استفاده می‌کنیم، اعم از مدل استوار و مدل قطعی، اگر برای سطوحی باشد که در آن مرکز جدیدی احداث می‌شود از متغیر باینری  $Y_j$  استفاده می‌کنیم و هزینه احداث آنرا در تابع هدف لحاظ

```

for t = 1 to T
Inputs: I: set of source
      J: set of applicant
      Dj: demand of applicant j
      Cai: capacity of source i
      V(I+J): encode solution of period t
Outputs: Xalocij: amount of shipment between nodes
        Yj: binary variable shows the opened applicant
        Uij: binary variable shows the source i assigned to applicant j

Step1: Xalocij=0  $\forall i \in I, \forall j \in J$ 
While V(I + J)  $\neq 0$ 
Step2: Select the maximum value of subsection I+J for the i+j index
      Select the minimum cost between index i and index j
Step3: Xalocij=min (Cai , Dj)
      Update demands and capacities
      Cai=Cai-Xalocij      Dj=Dj-Xalocij
Step4: if Cai=0 then V(I,J)=0
      If Dj=0 then V(I,J)=0
End while
Step5: for j=1 to J
      If  $\sum_j Xaloc_{ij} > 0$  then  $Y_j = 1$ 
      If  $Xaloc_{ij} > 0$  then  $U_{ij} = 1$ 
End for
End for
    
```

شکل (۲): شبه‌کد الگوریتم مرتب‌سازی غیرمسلط

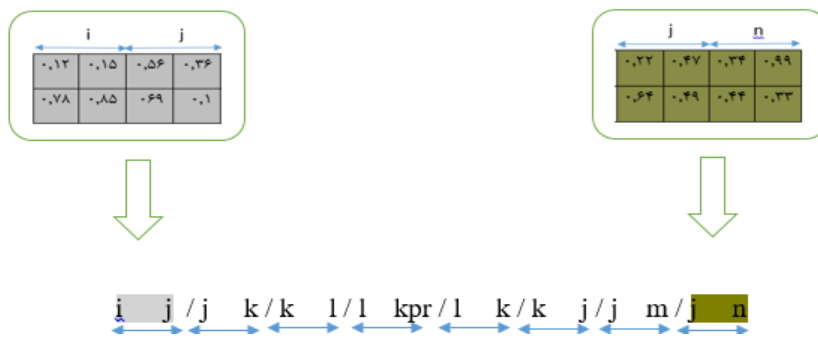


شکل (۳): مثال درخت حمل‌ونقل

نماینده یک مرکز است. به‌عنوان مثال هر ستون نماینده یک مرکز تأمین‌کننده است. حال باتوجه به این طراحی از کروموزوم، کراس اور را به این‌صورت تعریف می‌کنیم که،  $0/1$  هر کروموزوم با ضریبی تصادفی بین صفر و یک از کروموزوم دیگر جمع می‌شود به‌گونه‌ای که نهایتاً دو کروموزوم جدید تشکیل شده، از اعداد جدید بین صفر و یک تشکیل شده باشند [۸].

$i$				$j$		$m$				$j$		$n$	
۰,۱۲	۰,۱۵	۰,۵۶	۰,۳۶	۰,۴۵	...	۰,۳۵	۰,۴۷	۰,۲۲	۰,۴۷	۰,۳۴	۰,۹۹		
۰,۷۸	۰,۸۵	۰,۶۹	۰,۱	۰,۲۵	...	۰,۵۸	۰,۶۵	۰,۶۴	۰,۴۹	۰,۴۴	۰,۳۳		

شکل (۴). کروموزوم مربوط به مسأله شماره یک



شکل (۵). کروموزوم طراحی شده مربوط به سایرهای مختلف مسأله

عملگر تقاطع در الگوریتم ژنتیک، از ترکیب دو کروموزوم والد دو کروموزوم فرزند تشکیل می‌شود. این عمل به روش‌های مختلف می‌تواند تعریف شود. در این تحقیق کروموزوم از اعداد بین صفر و یک تشکیل شده است. ردیف‌های کروموزوم، دوره‌های زمانی مختلف و ستون‌های کروموزوم، قسمت‌های مختلف سطوح زنجیره‌تأمین هستند که هر قسمت به تعداد مرکز مورد نظر ستون دارد. در واقع هر ستون

۳. به‌ازای هر عضو از جمعیت مانند  $q$
۴. اگر  $p$  بر  $q$  غلبه کند انگه  $q$  را به  $sp$  اضافه کن.
۵. اگر  $q$  بر  $p$  غلبه کند انگه یک واحد به  $np$  اضافه کنید.
۶. تمام اعضای جمعیت که  $np=0$  باشد، به جبهه جواب‌های پارتو اول (بهترین جبهه جواب‌های پارتو) اضافه کنید.
۷. شمارنده جبهه‌ها را برابر با یک قرار دهید.  $k=1$
۸.  $Q$  را به‌عنوان پیش‌نویسی از  $F_{k+1}$  در نظر بگیرید.
۹. به‌ازای هر عضو از  $F_k$  مانند  $p$
۱۰. به‌ازای هر عضو از  $sp$  مانند  $q$  (تمام  $q$  هایی که توسط  $p$  مغلوب می‌شوند) یک واحد از  $Np$  کم کنید.
۱۱. اگر  $Np=0$  شود،  $q$  را به  $Q$  اضافه کنید.
۱۲. اگر  $Q$  خالی باشد فرآیند مرتب‌سازی تمام شده است.
۱۳. اگر  $Q$  خالی نباشد،  $F_{k+1}$  را برابر با  $Q$  در نظر بگیرید.
۱۴. یک واحد به  $k$  اضافه کنید و به مرحله ۸ بروید.

#### ۴-۴. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه

هر ذره دارای یک موقعیت است که مشخص می‌نماید مختصات ذره در فضای جست‌وجوی چندبعدی چه می‌باشد. با حرکت ذره در طول زمان موقعیت ذره تغییر می‌نماید.  $x_i(t)$  موقعیت ذره  $i$  ام در زمان  $t$  ام را مشخص می‌نماید. همچنین هر ذره برای حرکت نمودن در فضا نیاز

عملگر جهش مشابه تقاطع است با این تفاوت که به جای دو کروموزوم یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود و ژن‌های آن دچار تغییر می‌شود. حال باتوجه به اینکه کروموزوم در نظر گرفته شده برای این مسأله از اعداد بین صفر و یک تشکیل شده است، تغییر ژن‌ها در کروموزوم باید به‌گونه‌ای باشد که کروموزوم جدید جهش یافته، از اعداد جدید بین صفر و یک تشکیل شده باشد. به این ترتیب در این مسأله میوتیشن به این‌صورت تعریف می‌شود که وقتی کروموزومی برای عمل میوتیشن انتخاب می‌شود تعدادی از ژن‌های آن با  $0/1$  عددی تصادفی بین صفر و یک جمع می‌شود، به‌گونه‌ای که ژن‌های جدید بوجود آمده اعداد جدید بین صفر و یک را بوجود آورده باشند.

باتوجه به اینکه در الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط از مفهوم مغلوب کردن استفاده می‌کنیم و جواب‌هایی را که مغلوب نشده اند، برای ادامه روند الگوریتم انتخاب می‌کنیم، الگوریتم مرتب‌سازی غیرمسلط<sup>۱</sup> به‌شرح زیر است:

$S_p$ : مجموعه اعضای از جمعیت که توسط  $p$  مغلوب می‌شوند.

$N_p$ : تعداد دفعاتی که  $p$  توسط سایرین مغلوب می‌شود.

الگوریتم  $ns$ :

۱. به‌ازای تمام اعضای جمعیت:  $np=0$  و  $sp=\{\}$

۲. به‌ازای هر عضو از جمعیت مانند  $p$

به یک سرعت دارد  $v_i(t)$  سرعت ذره  $\Delta m$  در زمان  $t$ ام را مشخص می‌نماید. با افزودن سرعت به موقعیت هر ذره، می‌توان موقعیت جدیدی برای ذره در نظر گرفت. معادله به‌روز نمودن موقعیت ذره در رابطه زیر آورده شده است.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

$$x_i(t) \sim U(x_{min}, x_{max})$$

که  $v_i(t+1)$  سرعت فعلی ذره می‌باشد و به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c1r1(p_i - x_i(t)) + c2r2(p_g - x_i(t))$$

در این رابطه،  $r1$  و  $r2$  اعداد تصافی بین صفر و یک هستند.  $c1$  و  $c2$  به ترتیب ضرایب تأثیر شخصی و اجتماعی می‌باشند (این دو پارامتر، به ترتیب بیانگر میزان تأثیر بهترین حالت هر ذره و بهترین حالت جمعیت،  $c1$  ضریب اعتماد به نفس ذره و  $c2$  ضریب اعتماد به جمعیت نامیده می‌شوند).  $w$  ثابت اینرسی است که اگر مقدار آن زیاد باشد الگوریتم در حالت اکتشاف قرار می‌گیرد و اگر مقدار آن کم باشد الگوریتم در حالت استخراج قرار می‌گیرد. این پارامتر در طول اجرای الگوریتم کاهش می‌یابد.

بر حسب اینکه موقعیت یک ذره در فضای جست‌وجو، دارای موقعیت مناسبی است یا خیر، یک تابع شایستگی ارزیابی می‌گردد. ذرات توانایی این را دارند که بهترین موقعیتی را که در طول حیات خود در آن قرار داشته‌اند به‌خاطر بسپارند. به بهترین تجربه فردی یک ذره یا بهترین موقعیت ملاقات شده توسط ذره  $p_i$  گفته می‌شود و ذرات می‌توانند از بهترین موقعیت ملاقات شده توسط کل جمعیت نیز آگاهی داشته باشند که این موقعیت  $p_g$  نامیده می‌شود. بردار سرعت ذره در فرآیند بهینه‌سازی منعکس‌کننده دانش تجربی ذره و اطلاعات جمعیت ذرات است. هر ذره برای حرکت در فضای جست‌وجو دو مؤلفه را مدنظر دارد.

مؤلفه شناختی:  $p_i - x_i(t)$  بهترین راه‌حلی است که یک ذره به‌تنهایی به‌دست می‌آورد.

مؤلفه اجتماعی:  $p_g - x_i(t)$  بهترین راه‌حلی است که توسط کل گروه تشخیص داده می‌شود.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش جست‌وجوی چندعامله است، که عامل‌های آن در فضای جست‌وجو به‌صورت موازی عمل می‌کنند. مراحل این الگوریتم عبارتند از:

۱. ایجاد جمعیت اولیه.
۲. جدا کردن اعضای نامغلوب جمعیت و ذخیره کردن آن‌ها در آرشیو.
۳. جدول‌بندی فضای هدف کشف شده.
۴. هر ذره از میان اعضای آرشیو یک رهبر انتخاب می‌کند و حرکت خود را انجام می‌دهد.
۵. بهترین خاطره شخصی هر کدام از ذرات به‌روز می‌شود.
۶. اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به آرشیو اضافه می‌شوند.
۷. اعضای مغلوب آرشیو را حذف می‌کنیم.
۸. اگر تعداد اعضای آرشیو بیش از ظرفیت تعیین شده باشد اعضای

اضافی را حذف می‌کنیم و دوباره جدول‌بندی می‌کنیم.

۹. در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده‌اند به ۳ برگردید، و در غیر این صورت پایان.

#### ۴-۵. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه

در الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی (SA)، هر جواب  $s$  در فضای جست‌وجو مشابه یک حالت از یک سیستم فیزیکی است، و تابع  $E(s)$  که باید کمینه شود، مشابه با انرژی داخلی سیستم در آن حالت است. در این روش، هدف انتقال سیستم از حالت اولیه دلخواه، به حالتی است که سیستم در آن کمترین انرژی را داشته باشد. در هر مرحله، تبرید شبیه‌سازی شده یک جواب همسایه را در نظر می‌گیرد و به‌صورت احتمالی بین جابجایی به جواب جدید یا ماندن در جواب قبلی تصمیم می‌گیرد. این احتمالات در نهایت سیستم را به سمت حالت‌های با انرژی کمتر هدایت می‌کنند. معمولاً این مرحله آن قدر تکرار می‌شود که سیستم به یک حالت معقول برسد، یا اینکه میزان اعمال محاسباتی از یک حد مشخص عبور کند. همسایه‌های یک جواب، جواب‌های جدیدی از مسأله هستند که با تغییر در جواب کنونی و باتوجه به روشی از پیش تعیین شده ایجاد می‌شوند. مراحل این الگوریتم عبارتند از:

۱. آماده سازی دما و جواب اولیه.
۲. ساخت جواب همسایه.
۳. پذیرش جواب همسایه بهتر (باتوجه به تابع پذیرش، جواب همسایه‌ای که بهتر نبود پذیرفته می‌شود).
۴. در صورتی که شرایط تعادل برقرار است، دما کاهش می‌یابد، در غیر این صورت بازگشت به ۲.
۵. در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده‌اند بازگشت به ۲، در غیر این صورت پایان.

انواع شرایط خاتمه عبارتند از:

۱. رسیدن به حد قابل قبولی از پاسخ.
۲. سپری شدن زمان/تکرار معین.
۳. سپری شدن زمان/تعداد تکرار معین بدون مشاهده بهبود خاصی در نتیجه.

#### ۵. آزمون‌های محاسباتی و تحلیل نتایج عددی

برای تحلیل روش‌های حل مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید چندهدفه، ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه، با هدف بیشینه کردن سود و کمینه کردن آلودگی هوا، در دو صورت قطعی و استوار، مسائل نمونه با اندازه‌های مختلف (جدول (۳)) حل شد که نتایج آن در جدول‌های (۴) و (۵) ارائه می‌شود.

#### ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آینده

یابوری و گرایلی برای حل مسأله در ابعاد بزرگ الگوریتمی ابتکاری معرفی نمودند که میانگین در اختلاف با جواب بهینه ۱/۶۵ درصد است [۹]. در این پژوهش حل مسأله در ابعاد بزرگ الگوریتم‌های فراابتکاری

ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط، شبیه‌سازی تبرید چندهدفه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه استفاده شد و میانگین اختلاف با جواب بهینه ۰/۲ تا ۰/۸ درصد و در مدل‌های استوار ۰/۷ تا ۰/۹ درصد است. نتایج حل در جدول‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. از حل مسأله در قسمت مدل قطعی و مدل استوار این نتیجه گرفته شد که در حالت استوار با سود کمتری نسبت به مدل قطعی روبه‌رو هستیم. همچنین از مقایسه بین روش‌های فراابتکاری دریافتیم که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه<sup>۱</sup> نسبت به الگوریتم ژنتیک

مرتب‌سازی غیرمسلط و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه<sup>۲</sup> زمان اجرای کمتری به خود اختصاص دادند. باتوجه به معیارهای اندازه‌گیری استاندارد چندهدفه‌ی توضیح داده شده، عملکرد هر سه الگوریتم یکسان بود. به‌عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آینده می‌توان پارامترهای عدم قطعیت دیگری مانند تقاضا را به مدل غیرقطعی اضافه کرد و این مدل را در زمینه‌ها و مسائل مشابه دیگر به‌کار برد. همچنین می‌توان ادغام با مسأله مسیریابی را برای گسترش این مدل نیز در نظر گرفت.

جدول (۳): مسائل نمونه با اندازه‌های مختلف

شماره مسأله	تعداد تولید کنندگان	تعداد مراکز توزیع	تعداد انبار	تعداد خرده فروشان	تعداد مشتریان	تعداد مراکز انهدام	تعداد مراکز بازیافت	تعداد دوره های زمانی	تعداد مواد خام	تعداد مواد اولیه
۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۳
۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۳
۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۲	۴	۳
۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۲	۴	۳
۵	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۳	۴	۳
۶	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۳	۴	۳
۷	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۳	۴	۳
۸	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۶	۱۰	۷
۹	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۶	۱۰	۷
۱۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۵	۱۰	۷
۱۱	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۲۵	۱۰	۷
۱۲	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۲۵	۱۰	۷
۱۳	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۲۵	۱۰	۷

جدول (۴): مقالات منتشر شده پیرامون زنجیره تأمین حلقه بسته

نویسندگان	محصول			نوع مسأله				توابع هدف		مدل			روش حل			
	کشاورزی	صنایع غذایی	لبنیات	تولید-توزیع-مسیریابی	تولید-موجودی-مسیریابی	تولید-موجودی-مسیریابی	مکانیابی-مسیریابی-موجودی	زنجیره تأمین حلقه بسته	زیست‌محیطی	اقتصادی	اجتماعی	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح	سایر روش‌ها	فراابتکاری
کانگیسر و همکاران ۲۰۱۵ [۱۰]								*	*	*	*	*				*
بنسیک و همکاران ۲۰۱۷ [۱۱]				*				*	*	*	*	*				*
چراغعلی پور، پایدار و همکاران ۲۰۱۸ [۱۲]				*				*	*	*	*	*			*	*
کایزتا و همکاران ۲۰۰۶ [۳۱]				*				*	*	*	*	*				*
غلامیان و همکاران ۲۰۱۷ [۱۴]				*	*			*	*	*	*	*				*
یاوری و همکاران ۲۰۱۹			*					*	*	*	*	*				*
قهرمانی نهر و همکاران ۱۳۹۷ [۳]								*	*	*	*	*				*
گردرودباری و همکاران ۲۰۲۱ [۱۵]				*				*	*	*	*	*			*	*
قهرمانی نهر و همکاران ۲۰۲۰ [۱۶]								*	*	*	*	*				*

*	*					*	*	*	*							قاسم خانی، توکلی مقدم و همکاران [۱۷] ۲۰۲۱
*	*					*	*	*	*			*	*	*		گودرزبان، شیشه بری و همکاران ۲۰۲۱ [۱۸]
*	*				*			*	*				*			اباذری و همکاران ۲۰۲۱ [۱۹]
*						*	*	*		*				*		الاشهاب ۲۰۲۲ [۲۰]
*						*		*		*		*		*		یانسونگ و همکاران ۲۰۱۶ [۲۱]
*								*				*		*		مومنی و همکاران ۲۰۲۲ [۲۲]
*	*					*	*	*		*				*		فصیحی، توکلی مقدم و همکاران ۲۰۲۱ [۲۳]
*		*				*		*		*		*		*		سانگ و همکاران ۲۰۲۲ [۲۴]
*						*	*	*		*				*		فصیحی، توکلی مقدم و همکاران ۲۰۲۱ [۲۵]
*						*		*		*			*	*		قاسم خانی و همکاران ۲۰۱۹ [۲۶]
*	*					*		*	*	*				*		این تحقیق

جدول (۵): نتایج اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری و گمز در مدل قطعی و مقایسه آن‌ها

شماره مسأله نمونه	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات	چندهدفه: مقدار تابع هدف اول/مقدار تابع هدف دوم	الگوریتم شبیه‌سازی تبرید	چندهدفه: مقدار تابع هدف اول/مقدار تابع هدف دوم	الگوریتم ژنتیک چندهدفه: مقدار تابع هدف اول/مقدار تابع هدف دوم	حل دقیق: مقدار تابع هدف اول/مقدار تابع هدف دوم	میانگین زمان اجرا الگوریتم‌ها برحسب ثانیه	میانگین درصد اختلاف با جواب حل دقیق
۱	۱۶۲۳۰۷	۱۶۲۳۰۷	۱۰۲۳	۱۰۲۳	۱۶۲۲۸۰	۱۰۲۳	۵۶۸	۰/۲
۲	۲۴۴۹۳۰	۲۴۴۳۵۸	۱۳۱۴	۱۳۳۲	۲۴۴۵۲۶	۱۳۳۸	۱۲۰۰	۰/۵
۳	۳۲۹۷۹۰	۳۲۹۸۶۰	۱۲۶۷	۱۲۸۱	۳۲۹۱۸۰	۱۳۰۰	۲۰۰۰	۰/۷
۴	۶۲۱۴۶۰	۶۲۵۳۰۰	۲۵۸۹	۲۵۵۸	۶۲۳۷۶۰	۲۵۰۰	۲۱۰۰	۰/۸
۵	۷۴۷۶۲۰	۷۵۱۱۹۰	۳۱۵۱	۳۱۹۹	۷۵۰۳۸۰	۳۱۷۷	۲۱۰۰	۰/۷
۶	۸۷۲۱۱۰	۸۷۶۹۶۰	۴۱۹۹	۴۲۶۳	۸۷۶۲۲۰	۴۱۵۰	۲۱۰۰	۰/۹
۷	۱۶۴۳۳۰۰	۱۶۵۶۳۲۰	۱۸۷۴	۱۹۲۴	۱۶۵۱۶۰۰	۱۹۳۲	۲۵۰۰	۰/۸
۸	۲۹۶۷۵۰۵	۲۹۹۴۳۰۰	۳۲۴۵	۳۳۰۳	۲۹۸۸۲۰۰	۳۲۸۵	۲۷۰۰	۰/۶
۹	۳۷۰۹۹۱۵	۳۷۴۱۸۰۰	۴۴۸۹	۴۵۱۸	۳۷۳۸۲۰۰	۴۴۶۲	۴۰۰۰	۰/۷
۱۰	۱۸۹۲۵۹۳۰	۱۸۹۵۸۰۰۰	۲۵۴۴۹	۲۵۷۶۶	۱۸۹۴۶۰۰۰	۲۵۸۳۹	۴۰۰۰	-
۱۱	۲۸۲۶۵۰۰۰	۲۸۳۳۵۷۶۰	۳۷۱۶۹	۳۷۱۷۳	۲۸۲۹۳۰۰۰	۳۷۳۱۶	۴۵۰۰	-
۱۲	۳۷۶۱۱۷۶۰	۳۷۶۴۱۱۳۰	۴۹۲۲۸	۴۹۲۲۳	۳۷۶۳۵۰۰۰	۴۹۳۶۴	۴۵۰۰	-
۱۳	۴۷۰۱۵۰۰۰	۴۷۰۱۶۰۰۰	۶۱۱۱۴	۶۱۰۷۰	۴۷۰۰۷۰۰۰	۶۱۳۵۴	۴۵۰۰	-



جدول (۶): نتایج اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری و گمز در مدل استوار و مقایسه آن‌ها

شماره مسأله نمونه	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه: مقدار تابع هدف اول/مقدار تابع هدف دوم	الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه: مقدار تابع هدف اول/مقدار تابع هدف دوم	الگوریتم ژنتیک چندهدفه: مقدار تابع هدف اول/مقدار تابع هدف دوم	حل دقیق: مقدار تابع هدف اول/مقدار تابع هدف دوم	میانگین زمان اجرا الگوریتم‌ها برحسب ثانیه	میانگین درصد اختلاف با جواب حل دقیق
۱	۱۵۹۳۳۰ ۱۰۴۳	۱۵۹۴۵۰ ۱۰۴۳	۱۵۹۴۵۰ ۱۰۴۳	۱۶۰۸۷۵ ۱۰۲۳	۱۷۰۰	۰/۹
۲	۲۳۹۱۵۰ ۱۳۹۷	۲۳۹۴۴۰ ۱۳۷۴	۲۳۹۴۷۰ ۱۳۵۸	۲۴۱۰۴۹ ۱۳۶۵	۱۸۰۰	۰/۸
۳	۳۲۰۵۳۰ ۱۴۵۹	۳۲۲۳۰۰ ۱۳۷۴	۳۲۲۴۲۰ ۱۳۲۳	۳۲۴۱۴۷ ۱۳۷۹	۱۹۰۰	۰/۷
۴	۶۱۰۴۳۰ ۲۶۵۰	۶۱۰۶۰۰ ۲۶۹۸	۶۱۱۴۸۰ ۲۶۲۶	-	۲۰۰۰	-
۵	۷۳۰۸۰۰ ۳۲۷۱	۷۳۲۶۰۰ ۳۱۱۴	۷۳۳۴۳۰ ۳۲۵۰	-	۲۰۰۰	-
۶	۸۵۲۹۴۰ ۴۰۹۶	۸۵۲۵۶۰ ۴۰۶۸	۸۵۴۸۰۰ ۳۵۸۹	-	۲۰۰۰	-
۷	۱۶۲۷۷۰۰ ۲۱۲۳	۱۶۳۵۲۴۵ ۲۱۰۷	۱۶۳۳۸۰۰ ۲۱۱۸	-	۲۰۰۰	-
۸	۲۹۷۸۹۰۰ ۳۴۹۵	۲۹۴۸۸۰۰ ۳۴۵۲	۲۹۸۶۴۰۰ ۳۴۰۷	-	۲۱۰۰	-
۹	۳۷۲۶۹۰۰ ۴۶۹۲	۳۷۵۰۵۰۰ ۴۵۹۰	۳۷۴۶۱۰۰ ۴۶۴۶	-	۲۲۰۰	-
۱۰	۲۰۲۶۷۰۰۰ ۲۵۸۶۷	۲۰۰۰۵۸۰۵ ۲۵۹۰۴	۲۰۷۹۰۰۰۰ ۲۵۸۳۶	-	۴۰۰۰	-
۱۱	۳۰۲۶۷۰۰۰ ۳۷۹۷۵	۳۰۰۵۱۰۰۰ ۳۷۷۹۶	۳۰۹۲۷۰۰۰ ۳۷۷۹۰	-	۵۵۰۰	-
۱۲	۳۹۵۵۹۶۵۵ ۴۹۷۸۴	۳۹۴۲۲۰۰۰ ۴۹۸۵۳	۳۹۳۴۹۰۰۰ ۴۹۶۴۲	-	۶۵۰۰	-
۱۳	۴۹۸۲۸۶۴۴ ۶۱۹۲۶	۴۹۶۱۷۵۶۷ ۶۱۷۴۸	۵۰۰۴۳۲۶۵ ۶۱۷۰۵	-	۸۵۰۰	-

## مراجع

- [5] Mirmajlesi, S.R. and Shafaei, R., 2016. An integrated approach to solve a robust forward/reverse supply chain for short lifetime products. *Computers & Industrial Engineering*, 97, pp.222-239.
- [6] Taguchi, G., 1986. *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes (illustrate)*. White Plains: The Organization.
- [7] Gen M, Cheng RW, 1997. *Genetic algorithms and engineering design*. Wiley, New York.
- [8] Roghanian, E. and Cheraghalipour, A., 2019. Addressing a set of meta-heuristics to solve a multi-objective model for closed-loop citrus supply chain considering CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, 239, p.118081.
- [9] Yavari, M. and Geraeli, M., 2019. Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods. *Journal of Cleaner Production*, 226, pp.282-305.
- [10] Kannegiesser, M., Günther, H.O. and Autenrieb, N., 2015. The time-to-sustainability optimization strategy for sustainable supply network design. *Journal of Cleaner Production*, 108, pp.451-463.
- [1] Guide Jr, V.D.R. Van Wassenhove, L.N., 2006. Closed-loop supply chains: an introduction to the feature issue (part 1). *Production and Operations Management*, 15(3), pp.345-350.
- [2] Hauser, W.M. and Lund, R.T., 2003. *The remanufacturing industry: anatomy of a giant: a view of remanufacturing in America based on a comprehensive survey across the industry*. Department of Manufacturing Engineering, Boston University.
- [۳] قهرمانی نهر، جاوید. قدرت نما، علی. ایزد بخش، حمیدرضا. توکلی مقدم، رضا. ۱۳۹۷. طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز چندهدفه چندانحصولی و چنداندره‌ای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت. *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ص ۱۱۹-۱۳۷*.
- [4] Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J. and Van Wassenhove, L., 1995. Strategic issues in product recovery management. *California management review*, 37(2), pp.114-136.

- consumption. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, pp.1-30.
- [19] Abazari, S.R., Aghsami, A. and Rabbani, M., 2021. Prepositioning and distributing relief items in humanitarian logistics with uncertain parameters. *Socio-Economic Planning Sciences*, 74, p.100933.
- [20] Al-Ashhab, M.S., 2022. A multi-objective optimization modelling for design and planning a robust closed-loop supply chain network under supplying disruption due to crises. *Ain Shams Engineering Journal*, p.101909.
- [21] Yantong, L.I., Feng, C.H.U., Zhen, Y.A.N.G. and Calvo, R.W., 2016. A production inventory routing planning for perishable food with quality consideration. *Ifac-Papersonline*, 49(3), pp.407-412.
- [22] Momeni, M.A., Jain, V., Govindan, K., Mostofi, A. and Fazel, S.J., 2022. A novel buy-back contract coordination mechanism for a manufacturer-retailer circular supply chain regenerating expired products. *Journal of Cleaner Production*, 375, p.133319.
- [23] Fasihi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Najafi, S.E. and Hajiaghaei, M., 2021. Optimizing a bi-objective multi-period fish closed-loop supply chain network design by three multi-objective meta-heuristic algorithms. *Scientia Iranica*.
- [24] Song, L. and Wu, Z., 2022. An integrated approach for optimizing location-inventory and location-inventory-routing problem for perishable products. *International Journal of Transportation Science and Technology*.
- [25] Fasihi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Najafi, S.E. and Hajiaghaei-Keshteli, M., 2021. Developing a bi-objective mathematical model to design the fish closed-loop supply chain. *International Journal of Engineering*, 34(5), pp.1257-1268.
- [26] Ghasemkhani, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., Shahnejat-Bushehri, S., Momen, S. and Tavakkoli-Moghaddam, H., 2019. An integrated production inventory routing problem for multi perishable products with fuzzy demands and time windows. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), pp.523-528.
- [11] Banasik, A., Kanellopoulos, A., Claassen, G.D.H., Bloemhof-Ruwaard, J.M. and van der Vorst, J.G., 2017. Closing loops in agricultural supply chains using multi-objective optimization: A case study of an industrial mushroom supply chain. *International Journal of Production Economics*, 183, pp.409-420.
- [12] Cheraghali-pour, A., Paydar, M.M. and Hajiaghaei-Keshteli, M., 2018. A bi-objective optimization for citrus closed-loop supply chain using Pareto-based algorithms. *Applied Soft Computing*, 69, pp.33-59.
- [13] Caixeta-Filho, J.V., 2006. Orange harvesting scheduling management: a case study. *Journal of the Operational Research Society*, 57(6), pp.637-642.
- [14] Gholamian, M.R. and Taghazadeh, A.H., 2017. Integrated network design of wheat supply chain: A real case of Iran. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, pp.139-147.
- [15] Gerdodbari, M.A., Harsej, F., Sadeghpour, M. and Aghdam, M.M., 2022. A robust multi-objective model for managing the distribution of perishable products within a green closed-loop supply chain. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 18(5), p.3155.
- [16] Ghahremani Nahr, J., Pasandideh, S.H.R. and Niaki, S.T.A., 2020. A robust optimization approach for multi-objective, multi-product, multi-period, closed-loop green supply chain network designs under uncertainty and discount. *Journal of industrial and production engineering*, 37(1), pp.1-22.
- [17] Ghasemkhani, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., Rahimi, Y., Shahnejat-Bushehri, S. and Tavakkoli-Moghaddam, H., 2022. Integrated production-inventory-routing problem for multi-perishable products under uncertainty by meta-heuristic algorithms. *International Journal of Production Research*, 60(9), pp.2766-2786.
- [18] Goodarzian, F., Shishebori, D., Bahrami, F., Abraham, A. and Appolloni, A., 2021. Hybrid meta-heuristic algorithms for optimising a sustainable agricultural supply chain network considering CO<sub>2</sub>emissions and water



DOI: 10.22084/IER.2023.26822.2095

## A Robust Optimization Model for Designing of Green Close Loop Supply Chain of Perishable Products

Z. Kochakzadeh<sup>1</sup>, S. Gholami<sup>2\*</sup>, D. Rahmani<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M. A. student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Khajeh Nasiruddin Toosi University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Khajeh Nasiruddin Toosi University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Khajeh Nasiruddin Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### **Article history:**

Received: 2022/04/17

Accepted: 2022/07/11

#### **Keywords:**

Supply Chain Network of  
Perishable Products  
Uncertainty Planning  
Robust Optimization  
Meta-Heuristic Algorithm

### ABSTRACT

Air pollution and CO<sub>2</sub> emissions are important global issues, and reducing carbon emissions is one of the most important goals. In the supply chain of perishable products, delivery and distribution are significant issues, which many researchers have always paid attention to. In this research, we have used mixed integer linear programming to model the green supply chain, which includes two objective functions profit maximization and CO<sub>2</sub> emission minimization. Due to the occurrence of uncertainties, cost and price are uncertain, we have used the robust optimization approach, and presented a new robust optimization model. This problem is included in NP-hard problems and the exact method is not efficient in large dimensions. The exact solution method of the constraint epsilon, and for the large-scale problems, meta-heuristic algorithms of NSGA, MOSA and MOPSO were used. In order to obtain the best and most accurate solutions in meta-heuristic algorithms, the parameters were adjusted with the help of Taguchi's design. According to the results of validity tests, the average difference with the optimal solution is 0.2 to 0.8% and in robust models, it is 0.0.7 to 0.9%, which is acceptable. The lowest execution time is related to the MOSA algorithm, NSGA and MOPSO respectively, and the efficiency of these algorithms is not significantly different according to the standard multi-objective criteria.

\* Corresponding author. S. Gholami  
E-mail address: [s\\_gholami@kntu.ac.ir](mailto:s_gholami@kntu.ac.ir)