

## طراحی و بهینه‌سازی شبکه لجستیک معکوس در شرایط عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم ژنتیک

اکبر عالم تبریز\*، عماد روغنیان\*\*، مصطفی حسین زاده\*\*\*

### چکیده

در زنجیره تأمین، مدیریت برگشتی، در قالب لجستیک معکوس اعمال می‌شود. به دلایل مختلف، جریان مواد و کالاها در خلاف جهت عادی زنجیره، اجتناب‌ناپذیر است. پرداختن به موضوع شبکه لجستیک معکوس و مدیریت و هدایت موثر و ضروری است. با توجه به بررسی‌ها یکی از مواردی که تأثیر بسیاری بر مدل‌سازی شبکه لجستیک معکوس دارد، در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت است. در لجستیک معکوس، پارامترهایی مثل ظرفیت مراکز، تقاضا، هزینه و کیفیت و... غیرقطعی هستند. با توجه به این موارد، در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته احتمالی برای طراحی شبکه لجستیک معکوس ارائه شده است. برای حل این نوع مدل، ابتدا باید آن را به یک مدل قطعی تبدیل نمود. مدل ارائه شده در این تحقیق، چند محصولی و چند رده‌ای می‌باشد که همزمان، هزینه‌های حمل و نقل و احداث تسهیلات را در بر می‌گیرد. مدل مورد نظر با در نظر گرفتن کمینه‌سازی هزینه‌ها (هزینه‌های استقرار تسهیلات و هزینه‌های حمل‌ونقل) و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضای محصولات برگشتی، از نوع مسائل NP-Hard است که در آن، زمان حل مسأله به صورت نمایی و با توجه به ابعاد مسأله افزایش می‌یابد بنابراین، در این تحقیق، یک روش کارا با استفاده از الگوریتم ژنتیک با کدینگ اولویت - محور پیشنهاد داده شده است.

**کلید واژه‌ها:** زنجیره تأمین، لجستیک معکوس، برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته، شرایط عدم قطعیت، الگوریتم ژنتیک، کدینگ اولویت - محور.

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۸/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۳/۲.

\* دانشیار دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی.

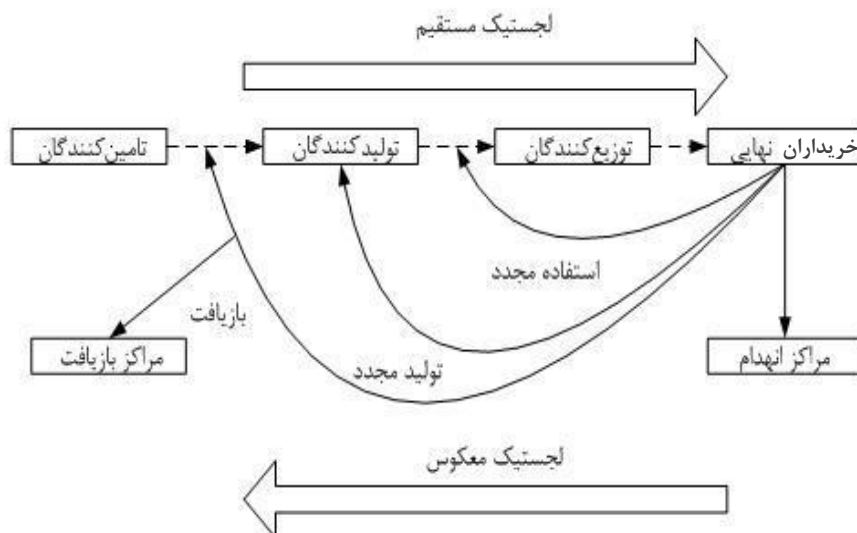
\*\* استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و صنایع، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

\*\*\* کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک (نویسنده مسئول).

Email: mstafa\_h@yahoo.com

### مقدمه

تغییرات و تحولات عمیق در دنیای کسب و کار و الزامات جدید تولید و تجارت در عصر کنونی، زمینه ظهور و بروز نگرش‌ها و پارادایم‌های جدیدی را فراهم ساخته است که باید مورد توجه دست اندر کاران عرصه تولید و تجارت قرار گیرد. در همین راستا، رویکرد و نگرش جدیدی پیرامون موضوع لجستیک تحت عنوان لجستیک معکوس به وجود آمده است. لجستیک، بخش فیزیکی زنجیره تأمین را در بر می‌گیرد و عمدتاً شامل کلیه فعالیت‌های مربوط به جریان مواد و کالاها از مرحله تهیه مواد خام تا تولید محصول نهایی از جمله حمل‌ونقل، انبارداری و غیره است. یکی از گرایش‌های جدید در مدیریت لجستیک، بازیافت، چرخه مجدد<sup>۱</sup> و یا استفاده مجدد از محصولات است. در این روش، محصولاتی که به پایان عمر مفیدشان می‌رسند، مجدداً از مصرف‌کننده نهایی خریداری می‌شوند و پس از دمونتاژ، قسمت‌هایی از محصول که قابلیت استفاده مجدد را دارند، دوباره در قالب محصولات اسقاطی به چرخه حیات برمی‌گردند [۱].



شکل ۱. جریان کالا در لجستیک مستقیم و معکوس [۱۳].

1. Recovery
2. Recycling

شبکه لجستیک معکوس - که بخشی از زنجیره تأمین است - را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: «انتقال دقیق، به موقع و درست مواد، اقلام و کالاهای قابل استفاده و غیرقابل استفاده از انتهای‌ترین نقطه و آخرین مصرف‌کننده از طریق زنجیره تأمین به واحد مناسب موردنظر» به عبارت دیگر، لجستیک معکوس، فرایند حرکت و انتقال برای کالاها و تولیداتی است که در زنجیره تأمین، قابلیت بازگشت دارند.

طراحی و اجرای شبکه لجستیک معکوس برای محصولات برگشتی، نه تنها هزینه‌های موجودی و حمل و نقل را کاهش می‌دهد بلکه باعث افزایش وفاداری مشتری نیز می‌گردد [۱۳]. انجمن اجرایی لجستیک معکوس آمریکا، لجستیک معکوس را به صورت زیر تعریف می‌کند: لجستیک معکوس عبارتست از فرایند موثر برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان مواد خام، موجودی نیمه ساخته، محصولات نهایی شده و اطلاعات مربوط به آنها به صورت مؤثر از لحاظ هزینه، از نقطه مصرف به نقطه مبدأ، با هدف خلق مجدد ارزش یا دفع مناسب [۱۴].

لجستیک معکوس با قطعاتی آغاز می‌شود که در زنجیره تأمین به عقب می‌روند؛ قطعاتی که برای بازیافت یا بازیابی ارزش و همچنین برای دفع مناسب جمع‌آوری می‌شوند. عوامل محرک شرکت‌ها برای روی آوردن به برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل لجستیک معکوس را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

- عوامل اقتصادی (مستقیم و غیرمستقیم)
- قوانین و مقررات
- مسئولیت پذیری در قبال حساسیت‌های زیست محیطی

طراحی شبکه لجستیک در ماهیتاً یک تصمیم استراتژیک است که معمولاً شامل تعیین محل تسهیلات، ظرفیت آنها، تعداد محصولات، تعداد رده‌ها در زنجیره، و نحوه ارتباط تسهیلات می‌باشد.

همه این موضوعات، تاثیر فراوانی بر کارایی و در نتیجه، عملکرد زنجیره تأمین دارند. از آنجا که احداث تسهیلات یا بستن آنها هزینه و زمان زیادی می‌برد، تغییر آنها در کوتاه‌مدت، امکانپذیر نمی‌باشد. همچنین سرمایه‌گذاری در تصمیمات استراتژیک طراحی شبکه، بازگشت سرمایه بیشتری نسبت به تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی دارد [۱۹].

یکی از موارد مهم در طراحی شبکه لجستیک معکوس که باید مورد توجه قرار گیرد، دستیابی به اهداف طولانی‌مدت و استراتژیک می‌باشد. بنابراین تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام تسهیل از میان تسهیلات بالقوه احداث شود، نقش بسیار مهمی در برای کاهش هزینه‌ها دارد.

### مرور ادبیات و پیشینه تحقیق

در چند سال اخیر افزایش توجه به مسائل زیست محیطی و رشد فرصت‌های مناسب برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها و منابع و یا افزایش درآمد از طریق محصولات برگشتی، باعث ترغیب محققان به بررسی لجستیک معکوس شده است. در زمینه طراحی شبکه‌های لجستیک که شامل مدل‌های مختلف بهینه‌سازی و مکانیابی تسهیلات بر پایه برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته است، کارهای زیادی در سراسر دنیا انجام شده است که در ادامه به بررسی مدل‌های ارائه شده می‌پردازیم.

مدل‌های لجستیک معکوس ارائه شده، از سه منظر زیر قابل بررسی هستند:

- مدل‌سازی برای استفاده مجدد
- مدل‌سازی برای بازیافت
- مدل‌سازی برای تولید مجدد

**مدل‌سازی برای استفاده مجدد:** کرون<sup>۱</sup> و همکارش ۱۹۹۵ یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را برای محصولات قابل استفاده مجدد ارائه کردند. مدل ارائه شده یک مدل جایابی بدون محدودیت ظرفیت کلاسیک می‌باشد که برای مطالعه موردی جعبه‌های حمل و نقل قابل استفاده مجدد طراحی شده است [۱۲].

**مدل‌سازی برای بازیافت:** باروس<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۸) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را برای طراحی شبکه لجستیک معکوس برای یک زنجیره دو رده‌ای با محدودیت ظرفیت برای بازیافت سنگ ارائه کردند. مدل ارائه شده با استفاده از یک رویکرد ابتکاری، تعداد و همچنین ظرفیت بهینه انبارها را مشخص می‌کند [۴].

**مدل‌سازی برای تولید مجدد:** جایارامن<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۹۹) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را برای طراحی شبکه لجستیک معکوس ارائه کردند که هدف از آن در این تحقیق، حداقل‌سازی هزینه می‌باشد. در این مقاله، تنها به فعالیت‌های مربوط به احیای محصولات برگشتی پرداخته شده است که هدف از آن، طراحی یک سیستم کششی بر اساس تقاضای مشتریان است [۹].

---

1. Kroon  
2. Barros  
3. Jayaraman

کریکه<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۹) یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته را برای یک شبکه لجستیک معکوس دو رده‌ای برای یک تولیدکننده دستگاه‌های کپی ارائه کردند. در این مدل، هزینه‌های پردازش محصولات برگشتی و موجودی در تابع هدف مورد توجه قرار گرفته است [۱۱].

جایارامن و همکاران (۲۰۰۳) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را برای طراحی شبکه لجستیک معکوس ارائه دادند. مدل ارائه شده که در سطوح استراتژیک پایه‌گذاری شده است، مشخص می‌کند کدام یک از مراکز بازتولید با توجه به محصولات برگشتی، احداث شوند [۸].

مین<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۵) یک مدل شبکه لجستیک چندکالایی، چند رده‌ای ارائه کردند که در آن از رویکرد «لاگرانژین ریلکسیشن» استفاده شده است [۱۶].

مین و همکاران (۲۰۰۶) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته را با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها ارائه کردند. برای حل مدل ارائه شده، از یک رویکرد باینری در الگوریتم ژنتیک استفاده شده است [۱۷].

کیم<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۶) یک چارچوب کلی را برای تولید مجدد ارائه کردند، به صورتی که مدل ریاضی ارائه شده، با هدف حداکثر سازی سود حاصل از صرفه‌جویی منابع، بتواند به تصمیم‌گیری در این باره پردازد که چه تعداد قطعه از تأمین کننده خریداری شود و چه تعداد قطعه از محصولات استفاده شده در هر مرکز تولید استفاده شود [۱۰].

اوستر<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۷) یک شبکه نیمه یکپارچه را طراحی کردند که در آن، فقط مراکز برگشت و احیا در لجستیک معکوس مکانیابی می‌شوند اما جریان مستقیم و معکوس همزمان بهینه می‌گردند. در این مقاله، یک روش حل دقیق بر مبنای روش تجزیه ارائه شده است [۲۱].

فروتا نتو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۸) چارچوبی را برای طراحی و ارزیابی شبکه‌های پایدار لجستیک معکوس بر اساس تحلیل پوششی داده‌ها و برنامه‌ریزی چندهدفه ارائه کردند. آنها در انتها به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، این مدل را در صنعت کاغذ و خمیر اروپا پیاده نمودند. در مدل دوهدفه ارائه شده در این مقاله، کمینه‌سازی هزینه‌ها و اثرات زیست محیطی، به عنوان دو هدف، در طراحی شبکه لجستیک در نظر گرفته شده است [۵].

- 
1. Krikke
  2. Min
  3. Kim
  4. Uster
  5. Frota Neto

پاتی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸) مدلی را بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته آرمانی برای حل مسأله و بررسی روابط اهداف در یک شبکه توزیع بازیافت کاغذ ارائه کردند. یکی از اهداف این مدل، کاهش هزینه‌های لجستیک معکوس می‌باشد [۱۸] (مدل‌سازی برای بازیافت). همان‌طور که بررسی‌ها نشان می‌دهند، اکثر تحقیقات گذشته، تنها به یکی از فرایندها و عملیات اصلی لجستیک معکوس پرداخته‌اند. لذا از آنجا که در تمامی مدل‌های لجستیک معکوس، فعالیت‌های تولید مجدد و استفاده مجدد، مرمت و تعمیر و نیز بازیافت از فعالیت‌های عمده به شمار می‌روند، به نظر می‌رسد ارائه مدلی که شامل بازیافت برای استفاده از مواد و محصولات بازیافتی و تولید مجدد برای به‌کارگیری مجدد قطعات در امر تولید باشد، مفید است. بنابراین:

لی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹) یک شبکه لجستیک معکوس سه رده‌ای را با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه کردند که هدف از آن، کمینه‌سازی هزینه‌های لجستیک معکوس است [۱۳].

با توجه به بررسی‌ها، یکی از مواردی که تأثیر بسیار بر مدل‌سازی شبکه لجستیک معکوس دارد، در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت می‌باشد. در لجستیک معکوس، پارامترهایی مثل ظرفیت مراکز، تقاضا، هزینه، کیفیت و... غیرقطعی هستند. با توجه به نبود قطعیت در لجستیک معکوس و برای انطباق شبکه لجستیک معکوس مورد نظر با عالم واقعیت، در این تحقیق، میزان تقاضای مراکز تولید و مراکز بازیافت، تصادفی در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده در این تحقیق، چند محصولی و چند رده‌ای می‌باشد که شامل مراکز برگشت، مراکز جداسازی، مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی، مراکز تولید و مراکز بازیافت است.

### تعریف مسأله و ارائه مدل ریاضی

شبکه مورد بررسی در این تحقیق، یک شبکه لجستیک معکوس است که قابلیت حمایت از انواع صنعتی را دارد که در آنها احیا و بازیافت محصولاتی که در پایان عمر قرار دارند انجام می‌گیرد. تسهیلات شبکه، به ترتیب، شامل مراکز برگشت، مراکز جداسازی، مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی، مراکز تولید و مراکز بازیافت می‌باشد. در مدل طراحی شده، محصولات برگشتی بعد از جمع‌آوری و بازرسی، به دو گروه محصولات قابل جداسازی و غیر قابل جداسازی تقسیم می‌شوند. محصولاتی که قابل تفکیک به قطعات هستند، به مراکز جداسازی فرستاده می‌شوند و در آنجا به قطعات تبدیل می‌گردند. قطعات به دو دسته قابل احیا و غیر قابل احیا

1. Pati  
2. Lee

تقسیم می‌شوند. قطعات غیر قابل احیا به صورت ایمن دفع و قطعات قابل احیا به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی فرستاده می‌شوند.

در فرایند ساخت مجدد، بر اساس میزان تقاضای مراکز تولید، قطعاتی که قابل استفاده مجدد هستند، بعد از کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی به کارخانه‌ها فرستاده می‌شوند و پس از ترکیب با قطعات دیگر به محصولات جدید تبدیل می‌شوند و به چرخه توزیع بازمی‌گردند.

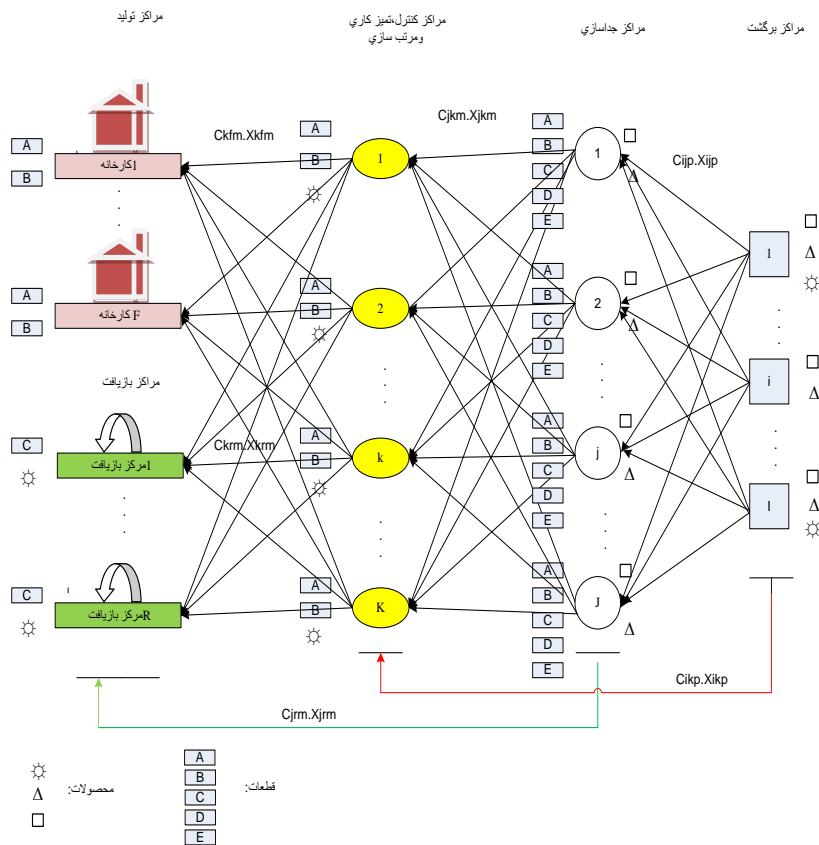
در فرایند بازیافت قطعات جداسازی شده قابل بازیافت بر اساس تقاضای مراکز بازیافت به منظور تولید مواد خام به صورت مستقیم از مراکز جداسازی به مراکز بازیافت منتقل می‌شوند.

بعضی محصولات که به جداسازی نیاز ندارند، بر اساس نوع محصول، به صورت مستقیم از مراکز جمع‌آوری به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی منتقل می‌شوند و از آنجا بر اساس نوع محصول و تقاضای مراکز تولید یا تقاضای مراکز بازیافت، به این مراکز فرستاده می‌شوند. (شکل ۲)

این شبکه، قابلیت حمایت از انواع صنایع مانند خودروسازی، پلاستیک‌سازی، کاغذسازی، ساخت تجهیزات الکترونیکی و غیره را دارد.

در این تحقیق، مدل شبکه لجستیک معکوس برای محصولات برگشتی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های احداث مراکز و حداقل‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است. مدل مورد نظر مشخص می‌کند که کدام یک از مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی باز شوند و همچنین بهترین استراتژی برای حمل‌ونقل محصولات و قطعات مورد نیاز مراکز کارخانه و مراکز بازیافت - که کمترین هزینه ثابت و کمترین هزینه حمل‌ونقل را در بر داشته باشند - چیست.

در لجستیک معکوس، پارامترهایی مثل ظرفیت مراکز، تقاضا، هزینه، کیفیت و... غیرقطعی هستند. با توجه به نبود قطعیت در لجستیک معکوس و برای انطباق شبکه لجستیک معکوس مورد نظر با عالم واقعیت، در این تحقیق، میزان تقاضای مراکز تولید و مراکز بازیافت، تصادفی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. شبکه لجستیک معکوس چند رده‌ای و چند محصولی

## مفروضات

- تقاضای مراکز تولید و مراکز بازیافت، به صورت متغیر، تصادفی در نظر گرفته شده است.
- تعداد مراکز برگشت، مراکز تولید و مراکز بازیافت، مشخص است.
- تعداد بالقوه مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی، مشخص است.
- بعضی محصولات که نیاز به جداسازی ندارند، به صورت مستقیم از مراکز برگشت به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی منتقل می‌شوند.
- بعضی قطعات، به صورت مستقیم، از مراکز جداسازی به مراکز بازیافت منتقل می‌شوند.



## مدل‌سازی ریاضی

نمادهای به کار گرفته شده در مدل ریاضی ارائه شده برای شبکه لجستیک معکوس بررسی و تعاریف آنها در جداول ۱، ۲، ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱. اندیس‌های استفاده شده در مدل

نماد	تعریف
$i$	مجموعه نقاط ثابت مراکز برگشت. $(i \in I)$
$j$	مجموعه نقاط بالقوه مراکز جداسازی $(j \in J)$
$k$	مجموعه نقاط بالقوه مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی $(k \in K)$
$f$	مجموعه نقاط ثابت مراکز تولید $(f \in F)$
$r$	مجموعه نقاط ثابت مراکز بازیافت $(r \in R)$
$p$	محصولات $(p \in P)$
$m$	قطعات $(m \in M)$

جدول ۲. متغیرهای تصمیم استفاده شده در مدل

نماد	تعریف
$x_{ijp}$	مقدار جریان محصول $p$ از مرکز برگشت $i$ به مرکز جداسازی $j$
$x_{ikp}$	مقدار جریان محصول $p$ از مرکز برگشت $i$ به مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی $k$
$x_{jkm}$	مقدار جریان قطعه $m$ از مرکز جداسازی $j$ به مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی $k$
$x_{jrm}$	مقدار جریان قطعه $m$ از مرکز جداسازی $j$ به مرکز بازیافت $r$
$x_{kfm}$	مقدار جریان قطعه $m$ از مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی $k$ به مرکز تولید $f$
$x_{krm}$	مقدار جریان قطعه $m$ از مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی $k$ به مرکز بازیافت $r$
$Y_{jm}$	اگر مرکز جداسازی $j$ برای قطعه $m$ احداث گردد ۱ و در غیر این صورت ۰
$Q_{km}$	اگر مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی $k$ برای قطعه $m$ احداث گردد ۱ و در غیر اینصورت ۰

جدول ۳. پارامترهای استفاده شده در مدل

نماد	تعریف
$I$	تعداد مراکز برگشت
$J$	تعداد مراکز جداسازی
$K$	تعداد مراکز کنترل، تمیز کاری و مرتب‌سازی
$F$	تعداد مراکز تولید
$R$	تعداد مراکز بازیافت
$P$	تعداد محصولات
$M$	تعداد قطعات
$a_{ip}$	ظرفیت مرکز برگشت $i$ برای محصول $p$
$b_{jm}$	ظرفیت مرکز جداسازی $j$ برای قطعه $m$
$u_{km}$	ظرفیت مرکز کنترل، تمیز کاری و مرتب‌سازی $k$ برای قطعه $m$
$d_{fm}$	تقاضای مرکز تولید $f$ برای قطعه $m$ (متغیر تصادفی)
$d_{rp}$	تقاضای مرکز بازیافت $r$ برای محصول $p$ (متغیر تصادفی)
$d_{rm}$	تقاضای مرکز بازیافت $r$ برای قطعه $m$ (متغیر تصادفی)
$n_{mp}$	تعداد قطعات $m$ به وجود آمده از جداسازی یک محصول $p$
$c_{ijp}$	هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد از محصول $p$ از مرکز برگشت $i$ به مرکز جداسازی $j$
$c_{ikp}$	هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد از محصول $p$ از مرکز برگشت $i$ به مرکز کنترل، تمیز کاری و مرتب‌سازی $k$
$c_{jkm}$	هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد از قطعه $m$ از مرکز جداسازی $j$ به مرکز کنترل، تمیز کاری و مرتب‌سازی $k$
$c_{jrm}$	هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد از قطعه $m$ از مرکز جداسازی $j$ به مرکز بازیافت $r$
$c_{kfm}$	هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد از قطعه $m$ از مرکز کنترل، تمیز کاری و مرتب‌سازی $k$ به مرکز تولید $f$
$c_{krm}$	هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد از قطعه $m$ از مرکز کنترل، تمیز کاری و مرتب‌سازی $k$ به مرکز بازیافت $r$
$c_{jm}^{pc}$	هزینه ثابت احداث مرکز جداسازی $j$ برای قطعه $m$
$c_{km}^{pc}$	هزینه ثابت احداث مرکز کنترل، تمیز کاری و مرتب‌سازی $k$ برای قطعه $m$

### تابع هدف مدل

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در این تحقیق قصد داریم مدلی برای طراحی شبکه لجستیک معکوس ارائه، به طوری که هزینه‌ها حداقل شود. بنابراین، با توجه به کمینه‌سازی هزینه‌ها مدلی باید ارائه شود که همزمان هزینه‌های احداث تسهیلات و همچنین هزینه‌های حمل و نقل محصولات و قطعات بین تسهیلات را کمینه کند. با توجه به تعاریف متغیرها و پارامترها و همچنین نکات بالا، تابع هدف مدل که شامل حداقل‌سازی هزینه احداث تسهیلات

(مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی) و همچنین هزینه جابجایی و حمل‌ونقل محصولات و قطعات در لجستیک معکوس می‌باشد، به صورت زیر مشخص می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P c_{jp}^{oc} Y_{jm} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M c_{km}^{oc} Q_{km} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P c_{ijp} x_{ijp} + \\ & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P c_{ikp} x_{ikp} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M c_{jkm} x_{jkm} + \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M c_{jrm} x_{jrm} + \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M c_{kfm} x_{kfm} + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M c_{krm} x_{krm} \end{aligned} \quad (1)$$

### محدودیت‌های مدل

۱- سلسله محدودیت‌های ظرفیت مراکز برگشت:

$$\sum_{j=1}^J x_{ijp} \leq a_{ip}, \forall i, p \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ikp} \leq a_{ip}, \forall i, p \quad (3)$$

این محدودیت‌ها بیان می‌دارند که مقدار محصولات ارسالی از هر مرکز برگشت به مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی باید کوچکتر یا مساوی با ظرفیت آن مرکز برگشت برای هر محصول باشد.

۲- سلسله محدودیت‌های ظرفیت مراکز جداسازی:

$$\sum_{k=1}^K x_{jkm} \leq b_{jm} Y_{jm}, \forall j, p, m \quad (4)$$

$$\sum_{r=1}^R x_{jrm} \leq b_{jm} Y_{jm}, \forall j, p, m \quad (5)$$

این محدودیت‌ها بیانگر آن هستند که تعداد قطعات ارسالی از هر مرکز جداسازی (در صورت احداث شدن) به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی و مراکز بازیافت باید کوچکتر یا مساوی با ظرفیت آن مرکز جداسازی برای هر قطعه باشد.

۳- سلسله محدودیت‌های ظرفیت مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی:

$$\sum_{f=1}^F x_{kfm} \leq u_{km} Q_{km}, \forall k, m \quad (6)$$

$$\sum_{r=1}^R x_{krm} \leq u_{km} Q_{km}, \forall k, m \quad (7)$$

این محدودیت‌ها بیانگر آن هستند که تعداد قطعات ارسالی از هر مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی (در صورت احداث شدن) به مراکز تولید و مراکز بازیافت باید کوچکتر یا مساوی با ظرفیت آن مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای هر قطعه باشد.

۴- سلسله محدودیت‌های تعادل محصولات و قطعات:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{jkm} \leq n_{mp} \left( \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijp} \right) \quad \forall m, p \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R x_{jrm} \leq n_{mp} \left( \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijp} \right) \quad \forall m, p \quad (9)$$

این محدودیت‌ها مربوط به تعادل جریان قطعات به دست آمده از جداسازی محصولات است.  $n_{mp}$  ضریب تبدیل می‌باشد.

۵- سلسله محدودیت‌های تعدیل تقاضای محصولات و قطعات بین رده‌ها:

$$P\left(\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{jkm} \geq \sum_{f=1}^F d_{fm}\right) \geq 1 - \alpha_{fm}, \quad \forall f, m \quad (10)$$

$$P\left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K x_{ikp} \geq \sum_{r=1}^R d_{rp}\right) \geq 1 - \alpha_{rp}, \quad \forall r, p \quad (11)$$

این محدودیت‌ها نشان می‌دهند که محصولات و قطعاتی که از مراکز برگشت و مراکز جداسازی به سمت مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی حمل می‌شوند، از طرف تقاضای مراکز تولید و مراکز بازیافت به صورت کششی هستند.

۶- سلسله محدودیت‌های تقاضای محصولات و قطعات:

$$P\left(\sum_{k=1}^K x_{kfm} \geq d_{fm}\right) \geq 1 - \alpha_{fm}, \quad \forall f, m \quad (12)$$

$$P\left(\sum_{k=1}^K x_{krp} \geq d_{rp}\right) \geq 1 - \alpha_{rp}, \quad \forall r, p \quad (13)$$

$$P\left(\sum_{j=1}^J x_{jrm} \geq d_{rm}\right) \geq 1 - \alpha_{rm}, \quad \forall r, m \quad (14)$$

محدودیت (12) نشان‌دهنده میزان تقاضای مراکز تولید برای قطعات به صورت تصادفی می‌باشد. رابطه (13) نشان‌دهنده میزان تقاضای مراکز بازیافت برای محصولات به صورت تصادفی می‌باشد. رابطه (14) نشان‌دهنده میزان تقاضای مراکز بازیافت برای قطعات به صورت تصادفی می‌باشد.

۷- سلسله محدودیت‌های بیشترین حد مجاز احداث مراکز:

$$\sum_{j=1}^J Y_{jm} \leq J, \quad \forall m \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^K Q_{km} \leq K, \quad \forall m \quad (16)$$

این محدودیت‌ها نشان‌دهنده حد بالای تعداد مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی (که مجاز به باز شدن می‌باشند) هستند.

۸- محدودیت‌های نامنفی بودن و صفر ویک:

$$X_{ijp}, X_{ikp}, X_{jkm}, X_{jrm}, X_{kfm}, X_{krm}, X_{jdm}, \geq 0, \quad \forall i, j, k, r, f, p, m \quad (17)$$

$$Y_{jm} = \{0,1\} \quad \forall j, m \quad (18)$$

$$Q_{km} = \{0,1\} \quad \forall k, m \quad (19)$$

اینها محدودیت‌های منطقی و بدیهی مربوط به متغیرهای تصمیم هستند. خلاصه رابطه‌های فوق به صورت مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه لجستیک معکوس با دو هدف حداقل‌سازی هزینه‌های ثابت و هزینه‌های حمل‌ونقل، به صورت زیر، ارائه می‌گردد:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P c_{jp}^{oc} Y_{jm} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M c_{km}^{oc} Q_{km} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P c_{ijp} X_{ijp} + \\ & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P c_{ikp} X_{ikp} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M c_{jkm} X_{jkm} + \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M c_{jrm} X_{jrm} + \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M c_{kfm} X_{kfm} + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M c_{krm} X_{krm} \end{aligned}$$

s. t

$$\sum_{j=1}^J x_{ijp} \leq a_{ip}, \forall i, p$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ikp} \leq a_{ip}, \forall i, p$$

$$\sum_{k=1}^K x_{jkm} \leq b_{jm} Y_{jm}, \forall j, p, m$$

$$\sum_{r=1}^R x_{jrm} \leq b_{jm} Y_{jm}, \forall j, p, m$$

$$\sum_{f=1}^F x_{kfm} \leq u_{km} Q_{km}, \forall k, m$$

$$\sum_{r=1}^R x_{krm} \leq u_{km} Q_{km}, \forall k, m$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{jkm} \leq n_{mp} \left( \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijp} \right) \forall m, p$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R x_{jrm} \leq n_{mp} \left( \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijp} \right) \forall m, p$$

$$P \left( \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{jkm} \geq \sum_{f=1}^F d_{fm} \right) \geq 1 - \alpha_{fm}, \forall f, m$$

$$P \left( \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K x_{ikp} \geq \sum_{r=1}^R d_{rp} \right) \geq 1 - \alpha_{rp}, \forall r, p$$

$$P \left( \sum_{k=1}^K x_{kfm} \geq d_{fm} \right) \geq 1 - \alpha_{fm}, \forall f, m$$

$$P \left( \sum_{k=1}^K x_{krp} \geq d_{rp} \right) \geq 1 - \alpha_{rp}, \forall r, p$$

$$P \left( \sum_{j=1}^J x_{jrm} \geq d_{rm} \right) \geq 1 - \alpha_{rm}, \forall r, m$$

$$\sum_{j=1}^J Y_{jm} \leq J, \forall m$$

$$\sum_{k=1}^K Q_{km} \leq K, \forall m$$

$$x_{ijp}, x_{ikp}, x_{jkm}, x_{jrm}, x_{kfm}, x_{krm}, x_{jdm} \geq 0, \forall i, j, k, r, f, p, m$$

$$Y_{jm} = \{0,1\} \forall j, m$$

$$Q_{km} = \{0,1\} \forall k, m$$

### محدودیت‌های غیرقطعی و قطعی سازی مدل

همانطور که مشاهده می‌شود، مدل ما برای انطباق با عالم واقعیت، به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته غیرقطعی ارائه شده است. برای غلبه بر عدم قطعیت و حل مدل، ابتدا باید مدل غیرقطعی بالا را به یک مدل قطعی تبدیل کرد.

بنابراین، اگر  $X$  یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال باشد.

$$X \sim n(\mu, \sigma^2)$$

تابع توزیع چگالی آن به صورت زیر خواهد بود

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

$$-\infty < X < +\infty$$

به طوری که اگر

$$Z = \frac{X-\mu}{\sigma} \sim n(0,1)$$

حاصل می‌شود:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2}$$

$$-\infty < Z < +\infty$$

$$P(Z > z_\alpha) = \alpha, P(Z < z_\alpha) = 1 - \alpha$$

برای مثال، محدودیت غیرقطعی زیر را در نظر بگیرید:

$$\sum_{j=1}^n X_j \leq K$$

که در آن،  $K$  یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال است

$$K \sim n(\mu, \sigma^2)$$

بنابراین

$$P(\sum_{j=1}^n X_j \leq K) \geq 1 - \alpha$$

برابر است با

$$P\left(\frac{K-\mu}{\sigma} > \frac{\sum_{j=1}^n X_j - \mu}{\sigma}\right) \geq 1 - \alpha$$

یا

$$P\left(Z > \frac{\sum_{j=1}^n X_j - \mu}{\sigma}\right) \geq 1 - \alpha$$

که در نتیجه:

$$\frac{\sum_{j=1}^n X_j - \mu}{\sigma} \leq Z_{1-\alpha}$$

یا

$$\sum_{j=1}^n X_j \leq \sigma \cdot Z_{1-\alpha} + \mu$$

بنابراین

$$P\left(\sum_{j=1}^n X_j \leq K\right) \geq 1 - \alpha \approx \sum_{j=1}^n X_j \leq \sigma \cdot Z_{1-\alpha} + \mu \quad (20)$$

با استفاده از رابطه (۲۰) می‌توان مدل غیرقطعی فوق که دارای محدودیت‌های غیرقطعی با توزیع نرمال می‌باشد - را به یک مدل قطعی تبدیل کرد. برای حل چنین مدل‌هایی می‌توان از نرم‌افزارهای موجود در این زمینه، از جمله LINDO یا QSB استفاده کرد. اما چنین روش‌هایی در مواجهه با این گونه مسائل، مخصوصاً در ابعاد بزرگ، با مشکلاتی از جمله وقت گیر بودن، افتادن در نقطه بهینه محلی و عدم توانایی در خروج از آن مواجه می‌شوند. الگوریتم ژنتیک می‌تواند روشی کارآمد و مفید برای حل این گونه مسائل باشد. در بخش بعدی تحقیق، با توجه به مدل و همچنین مفهوم الگوریتم ژنتیک، یک روش کارا برای حل مسأله پیشنهاد می‌شود.

### روش‌شناسی حل مسأله

شبکه لجستیک معکوس مورد بررسی در این تحقیق در دسته NP-Hard قرار دارد که برای حل آن نمی‌توان از روش‌های دقیق استفاده کرد. محققان برای حل این گونه مسائل، از روش‌های ابتکاری و فراالبتکاری - که بر پایه بهینه‌سازی مسائل ترکیبی استوارند - استفاده می‌کنند. در این تحقیق نیز برای حل مسأله مورد نظر از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک پیشنهاد داده شده در این تحقیق، اولویت - محور می‌باشد که در این بخش به تبیین قسمتهای مختلف آن می‌پردازیم.

### نمایش جواب

نمایش جواب، یکی از مهمترین عواملی است که تاثیر قابل توجهی بر عملکرد الگوریتم ژنتیک دارد. معمولاً مسائل مختلف، دارای داده‌های گوناگون هستند که نیاز به روش‌های نمایش مختلف، منحصر به فرد و کارا دارند [۷].

تا کنون رویکردهای مختلفی برای کدینگ جواب در مسائل طراحی شبکه ارائه شده است. میخایلوویچ ۱ و همکاران (۱۹۹۱) روش کدینگ ماتریسی را برای حل مسائل حمل و نقل خطی و غیرخطی ارائه کردند. اگر  $|k|$  را تعداد مبادی و  $|j|$  را تعداد مقاصد تعریف کنیم، در این رویکرد، جواب به صورت ماتریس  $|K|.|J|$  نمایش داده می‌شود. هر چند نمایش جواب در این حالت، بسیار



ساده است، اما نیاز به تعریف اپراتورهای خاص برای شدنی شدن جواب‌ها وجود دارد و حافظه زیادی نیز اشغال می‌شود [۱۵]. جن<sup>۱</sup> و همکارش برای حل مسائل شبکه از رویکرد درخت پوشا استفاده کردند. در این رویکرد، از یک روش خاص بر مبنای عدد پروفور استفاده می‌شود و جواب به صورت یک بردار با اندازه  $2-|J|+|K|$  نمایش داده می‌شود [۷]. سیاریف<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۲) از یک الگوریتم ژنتیک بر پایه عدد پروفور برای حل یک مسأله لجستیک مستقیم تک محصولی و سه رده‌ای استفاده کردند [۲۰]. یو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۸) نیز از رویکرد الگوریتم ژنتیک بر پایه عدد پروفور برای حل یک مسأله لجستیک مستقیم چندهدفه استفاده کردند. اما این روش ممکن است به جوابهای غیرموجه برسد که برای جلوگیری از آن نیز الگوریتم‌های مکمل ارائه شده است [۲۲]. برای فرار از الگوریتم‌های مکمل، جن و همکارش روش کدینگی را بر مبنای اولویت ارائه دادند [۷]. جن و همکاران (۲۰۰۶) برای حل یک مسأله لجستیک مستقیم دو رده‌ای تک کالایی، از الگوریتم ژنتیک اولویت - محور استفاده کردند [۶]. التیپارماک<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۶) از الگوریتم ژنتیک اولویت - محور برای حل یک مسأله لجستیک مستقیم تک کالایی، تک منبعی و سه رده‌ای استفاده کردند [۳]. التیپارماک و همکاران (۲۰۰۹) نیز از این روش برای حل یک مسأله لجستیک مستقیم چند کالایی، چند رده‌ای و تک منبعی استفاده کردند [۲].

### نمایش جواب بر اساس کدینگ اولویت - محور

در کدینگ اولویت - محور، هر ژن در کروموزم، حاوی دو نوع ویژگی زیر می‌باشد:

- موقعیت هر ژن در ساختار کروموزم
- ارزش یا مقدار هر ژن در ساختار کروموزم

موقعیت هر ژن در ساختار کروموزم، نشاندهنده یک گره (مقصد یا مبدا) در شبکه و ارزش یا مقدار هر ژن در ساختار کروموزم، نشاندهنده اولویت آن گره می‌باشد. اگر فرض کنیم  $|m|$  تعداد مبادی و  $|n|$  تعداد مقاصد باشد، طول کروموزم به صورت  $|m|+|n|$  تعریف می‌شود. هر درخت در مسأله که مطابق با یک جواب برای مسأله است، از طریق دیکد کردن یک کروموزم به دست می‌آید. [۷].

در هر مرحله، با استفاده از اولویت هر ژن که برابر با ارزش یا مقدار هر ژن در کروموزم است، یک گره (مبدا یا مقصد) انتخاب می‌شود و با توجه به ماتریس هزینه‌ها، یک گره (مبدا یا مقصد)

1. Gen  
2. Syarif  
3. Xu  
4. Altiparmak

با کمترین هزینه انتخاب می‌شود. در شکل ۳ مراحل الگوریتم اولویت - محور برای هر قسمت از جواب به نمایش در آمده است [۲].

### الگوریتم ۱: الگوریتم اولویت - محور برای هر قسمت از جواب

ورودی‌ها:

$K$ : مجموعه مبادی

$J$ : مجموعه مقاصد

$b_j$ : تقاضا در مقصد  $j$ ,  $(j \in J)$  برای محصول  $p$  یا قطعه  $m$

$a_{kj}$ : ظرفیت منبع  $k$ ,  $(k \in K)$  برای محصول  $p$  یا قطعه  $m$

$c_{kj}$ : هزینه حمل یک واحد محصول  $p$  یا یک واحد قطعه  $m$  از مبدأ  $k$  به مقصد  $j$

$v(k+j)$ : جواب کد شده به صورت کروموزم‌های  $(k \in K)$ ,  $(j \in J)$

خروجی‌ها:

$x_{kj}$ : مقدار جریان بین گره‌ها

تا زمانی که  $\sum_{j=1}^J b_j \geq 0$

مرحله ۱:  $x_{kj} = 0, \forall k \in K, \forall j \in J$

مرحله ۲: انتخاب یک گره بر اساس  $arg \max \{v(k), \tau \in |k| + |j|\}, \forall k \in K, \forall j \in J$

مرحله ۳: اگر  $l \in k$  باشد، نگاه انتخاب مبدأ  $k^* = l$  و  $j^* = arg \min \{c_{kj} | v(j) \neq 0, j \in J\}$  انتخاب مقصد با کمترین هزینه

در غیر اینصورت، یک مقصد انتخاب می‌شود  $j^* = l$  و  $k^* = arg \min \{c_{kj} | v(j) \neq 0, k \in K\}$  انتخاب مبدأ با کمترین هزینه

مرحله ۴:  $x_{k^*j^*} = \min\{a_{k^*}, b_{j^*}\}$  و به روز رسانی مقادیر تقاضا و ظرفیت

$$b_{j^*} = b_{j^*} - x_{k^*j^*}, a_{k^*} = a_{k^*} - x_{k^*j^*}$$

مرحله ۵: اگر  $a_{k^*} = 0$  آنگاه  $v(k^*) = 0$

اگر  $b_{j^*} = 0$  آنگاه  $v(j^*) = 0$

مرحله ۶: اگر  $v(k+j) = 0, \forall j \in J$  آنگاه  $x_{kj}$  و جمع هزینه‌ها محاسبه می‌گردد. در غیر این صورت به مرحله ۱ برگرد

پایان

شکل ۳. الگوریتم اولویت محور برای هر قسمت از جواب مسأله

حال اگر بخواهیم روش نمایش جواب اولویت - محور را برای مسأله مورد بررسی به کار بریم. طرح کدینگ هر جواب (کروموزم) را باید به شش قسمت تقسیم کنیم که هر قسمت، مربوط به یک رده (مرحله) از مسأله لجستیک معکوس مورد بررسی می‌باشد.

قسمت اول، مربوط به مراکز برگشت و مراکز جداسازی می‌باشد (I-J)؛ قسمت دوم به مراکز برگشت و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی اختصاص دارد (I-K)؛ قسمت سوم، مربوط به مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی می‌باشد (J-k)؛ قسمت چهارم به مراکز

جداسازی و مراکز بازیافت اختصاص دارد (J-R)؛ قسمت پنجم، مربوط به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی و مراکز بازیافت می‌باشد (K-R) و در نهایت، قسمت ششم به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی و مراکز تولید اختصاص دارد (K-F). (شکل ۴)

گره	قسمت چهارم J-R						قسمت پنجم K-R						قسمت ششم K-F					
	1	2	3	4	1	2	1	2	3	4	1	2	1	2	3	4	1	2
اولویت	5	4	1	6	2	3	6	3	1	5	2	4	3	1	4	5	2	6
	قسمت اول I-J						قسمت دوم I-K						قسمت سوم J-K					
	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
	2	7	1	5	2	7	1	5	2	7	1	5	2	7	1	5	2	7

شکل ۴. کروموزم برای کدینگ مسأله لجستیک معکوس مورد بررسی

با توجه به اینکه تقاضای مراکز تولید و مراکز بازیافت برای محصولات و قطعات، کشتی است، باید دقت داشت که برای مسأله لجستیک معکوس مورد بررسی، کروموزم در جهت معکوس دی‌کد می‌گردد. ترتیب دی‌کد کردن کروموزم از منطق خاصی پیروی می‌کند: ابتدا قسمت ششم و سپس به ترتیب قسمت‌های پنجم تا اول برای به دست آوردن یک جواب از مسأله مورد نظر با استفاده از الگوریتم (۲) دی‌کد می‌گردند. در شکل ۵ مراحل دیکد کردن هر کروموزم برای مسأله مورد نظر نشان شده است.

**ورودی‌ها:**

$$b_{jm}, u_{km}, d_{fm}, d_{rp}, d_{rm}, n_{mp}, c_{ijp}, c_{ikp}, c_{jkm}, c_{jrm}, c_{kfm}, c_{krm}, c_{jm}^{oc}, c_{km}^{oc}, a_{ip}$$

$$, x_{ikp}, x_{jkm}, x_{jrm}, x_{kfm}, x_{krm}, Y_{jm}, Q_{km}, x_{ijp}$$

مرحله ۱: به دست آوردن  $Q_{km}, x_{kfm}$  با استفاده از الگوریتم ۱  $\forall k \in K, f \in F, m \in M$

مرحله ۲: به دست آوردن  $Q_{km}, x_{krm}$  با استفاده از الگوریتم ۱  $\forall k \in K, r \in R, m \in M$

مرحله ۳: به دست آوردن  $Y_{jm}, x_{jrm}$  با استفاده از الگوریتم ۱  $\forall j \in J, r \in R, m \in M$

مرحله ۴: به دست آوردن  $Y_{jm}, x_{jkm}$  با استفاده از الگوریتم ۱  $\forall j \in J, k \in K, m \in M$

مرحله ۵: به دست آوردن  $x_{ikp}$  با استفاده از الگوریتم ۱  $\forall i \in I, k \in K, p \in P$

مرحله ۶: به دست آوردن  $x_{ijp}, x_{kfm}$  با استفاده از الگوریتم ۱  $\forall i \in I, j \in J, p \in P$

شکل ۵. مراحل دیکد کردن هر کروموزم برای مسأله لجستیک معکوس مورد بررسی

### عملگر انتخاب

یکی از موارد مهمی که تاثیر مستقیم بر الگوریتم ژنتیک دارد، اپراتور انتخاب است. اپراتور انتخاب، فضای جستجوی جدیدی را برای الگوریتم فراهم می‌کند که در آن، هر یک از والدین انتخاب شده از نسل قبلی، فرصت تولید مثل برای نسل جدید را پیدا می‌کنند. روش‌های مختلفی برای انتخاب کروموزم‌ها در الگوریتم‌های ژنتیک وجود دارد که عبارتند از انتخاب تصادفی، انتخاب بر اساس چرخ رولت، رتبه‌بندی، انتخاب بر اساس بهترین‌ها، انتخاب بر اساس مقیاس‌بندی، و انتخاب بر اساس تورنمنت [۷].

در این تحقیق از روش انتخاب بر اساس تورنمنت برای به دست آوردن جمعیت اولیه فرزندان در نسل جدید استفاده می‌شود، بدین صورت که دو تیم از کروموزم‌ها - که هر تیم حاوی دو کروموزم می‌باشد- به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. بهترین کروموزم‌های هر تیم برای عملگر تقاطع انتخاب می‌شوند.

### عملگر تقاطع

اپراتور تقاطع با استفاده از ترکیب اطلاعات و ویژگی‌های مربوط به کروموزم‌های والدین و از طریق تعویض قسمت‌های کروموزم والدین فرزندان جدید تولید می‌شود و امکان جستجو در یک فضای جدید در الگوریتم را به وجود می‌آورد [۱۷].

عملگر تقاطع مورد استفاده در این تحقیق،<sup>۱</sup> WMX است که تک نقطه‌ای می‌باشد. در این عملگر، ابتدا یک نقطه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود که دو کروموزم انتخاب شده را به دو بخش تقسیم می‌کند. برای به وجود آوردن فرزندان کروموزم‌ها، بخش‌های متناظرشان را با یکدیگر تعویض می‌کنند.

در شکل ۶ نحوه عملکرد WMX نشان داده شده است [۱۳].

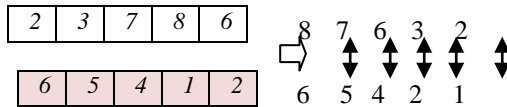
مرحله ۱: انتخاب یک نقطه تصادفی

والد ۱	3	9	7	8	6	5	4	1	2
والد ۲	5	9	4	1	2	3	7	8	6

مرحله ۲: تعویض بخشهای متناظر بین والدین

فرزند ۱	3	9	7	8	2	3	7	8	6
فرزند ۲	5	9	4	1	6	5	4	1	2

مرحله ۳: مرتب کردن بخش راست کروموزمها و تعویض ژنهای متناظر



مرحله ۴: تعویض ژنها با نگاهشهای متناظر

فرزند ۱	3	9	7	8	1	2	5	6	4
فرزند ۲	5	9	4	1	8	7	6	2	3

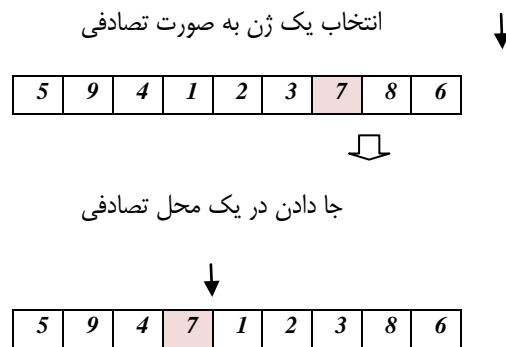
شکل ۶- نحوه عملکرد WMX [۱۳].

### عملگر جهش

بعد از تقاطع، برای جلوگیری از همگرایی زودرس، بعضی فرزندان باید دستخوش تغییر گردند. جهش نیز همانند عملگر تقاطع، امکان جستجو در یک فضای جدید در الگوریتم را به وجود می‌آورد [۲].

عملگر جهش مورد استفاده در این تحقیق، روش جا دادن<sup>۱</sup> می‌باشد که در آن، یک ژن به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و در یک محل تصادفی قرار می‌گیرد. در شکل ۷، نحوه عملکرد عملگر جهش جا دادن نشان داده شده است [۶].

1. Insert mutation



شکل ۷. نحوه عملکرد عملگر جهش [۶].

### عملگر ارزیابی

در فرایند ارزیابی، برازندگی هر کروموزم با دیگر کروموزم‌ها در جمعیت مقایسه می‌شود. از آنجا که تابع ارزیابی باید با استفاده از ویژگی‌های کروموزم‌ها میزان شایستگی هر کروموزم را به طور دقیق مشخص نماید، انتخاب تابع ارزیابی، بسیار مهم است [۱۳]. در این تحقیق، تابع هدف مسأله به عنوان عملگر ارزیابی در نظر گرفته شده است.

### ارائه مثال

برای آزمودن کارایی مدل و الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، به ارائه یک مثال می‌پردازیم. در این مثال، یک شبکه لجستیک معکوس سه محصولی به شرح زیر داریم:

- ⊕: پس از جداسازی به یک واحد قطعه A و دو واحد قطعه B تبدیل می‌شود.
  - Δ: پس از جداسازی به یک واحد قطعه B و یک واحد قطعه C تبدیل می‌شود.
  - \*: نیاز به جداسازی ندارد و مستقیماً از مراکز برگشت به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی فرستاده می‌شود.
- قطعات A و B، قابل استفاده مجدد می‌باشند که پس از بازرسی در مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی به مراکز تولید فرستاده می‌شوند.
- قطعه C، قابل بازیافت می‌باشد که مستقیماً از مراکز جداسازی به مراکز بازیافت فرستاده می‌شود. محصول \* قابل بازیافت می‌باشد و با توجه به اینکه نیاز به جداسازی ندارد، مستقیماً از مراکز برگشت به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی فرستاده می‌شود و پس از عملیات تمیزکاری به مراکز بازیافت فرستاده می‌شود.

قطعات D و E، غیر قابل استفاده مجدد و غیر قابل بازیافت می‌باشند که باید به صورت ایمن دفع گردند.

شبکه لجستیک معکوس ارائه شده در این مثال، یک شبکه سه‌رده‌ای است که دارای دو مرکز تولید، دو مرکز بازیافت، چهار مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی، چهار مرکز جداسازی و سه مرکز برگشت می‌باشد.

در این مثال، بیشترین حد مجاز برای احداث مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی هر قطعه یا محصول، ۳ در نظر گرفته شده است.

اطلاعات مربوط به ظرفیت مراکز برگشت در جدول ۴ ارائه شده. در جدول ۵، اطلاعات مربوط به ظرفیت مراکز جداسازی هر محصول و هر قطعه و همچنین هزینه ثابت احداث هر مرکز جداسازی برای هر قطعه، نمایش داده شده است. اطلاعات مربوط به ظرفیت مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای هر محصول و هر قطعه و همچنین هزینه ثابت احداث هر مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای هر قطعه و محصول، در جدول ۶ ارائه شده است. در جدول ۷، اطلاعات مربوط به تقاضای غیرقطعی (توزیع نرمال) مراکز تولید و مراکز بازیافت، نمایش داده شده است.

هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول از مراکز برگشت به مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی در جدول ۸ ارائه شده است. جدول ۹، هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول از مراکز جداسازی به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی و مراکز بازیافت، را نشان می‌دهد. جدول ۱۰ اطلاعات مربوط به هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول از مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی به مراکز تولید و مراکز بازیافت را نشان می‌دهد.

جدول ۴. ظرفیت مراکز برگشت

مراکز برگشت	محصولات		
	⊕	Δ	*
1	35	50	20
2	20	40	25
3	25	50	20

جدول ۵. ظرفیت مراکز جداسازی برای هر محصول و هر قطعه و همچنین هزینه ثابت احداث هر مرکز جداسازی برای هر قطعه

مراکز جداسازی	محصولات		قطعات					هزینه ثابت احداث				
	□	⊗	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	35	70	35	70	70	35	70	85	60	75	50	70
2	30	60	30	60	60	30	60	90	110	110	100	60
3	20	75	20	75	40	20	75	70	55	80	65	100
4	20	50	20	50	40	20	50	100	110	140	110	120

جدول ۶. ظرفیت مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای هر محصول و هر قطعه و همچنین هزینه ثابت احداث هر مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای هر قطعه و محصول

	قطعات			هزینه ثابت احداث		
	A	B	*	A	B	*
1	20	35	15	100	90	110
2	40	65	20	70	85	95
3	30	50	10	120	70	100
4	35	70	20	60	100	70

جدول ۷. اطلاعات مربوط به تقاضای غیرقطعی (توزیع نرمال) مراکز تولید و مراکز بازیافت

مراکز تولید	تقاضای قطعه		مراکز بازیافت	تقاضای قطعه	
	$A \sim (\mu_A, \sigma_A^2)$	$B \sim (\mu_B, \sigma_B^2)$		$C \sim (\mu_C, \sigma_C^2)$	$* \sim (\mu_*, \sigma_*^2)$
1	N(40,16)	N(50,25)	1	N(20,4)	N(20,4)
2	N(30,9)	N(60,36)	2	N(10,1)	N(30,9)

جدول ۸. هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از مراکز برگشت به مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی

مراکز برگشت	مراکز جداسازی				مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	6	2	5	1	5	2	4	3
2	4	3	6	5	4	6	3	5
3	3	2	6	2	3	6	5	2

جدول ۹. هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از مراکز جداسازی به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی و مراکز بازیافت

مراکز جداسازی	مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی				مراکز بازیافت	
	1	2	3	4	1	2
1	3	5	2	4	4	2
2	6	2	5	1	5	6
3	4	3	6	5	3	5
4	2	4	3	2	2	3



جدول ۱۰. هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی به مراکز تولید و مراکز بازیافت

	مراکز تولید		مراکز بازیافت	
	1	2	1	2
مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی				
1	4	3	5	3
2	3	5	4	5
3	1	6	3	6
4	2	4	6	4

با در نظر گرفتن  $1 - \alpha = 0/95$  به عنوان سطح اطمینان برای تمامی  $\alpha$ ها برای تمامی محدودیت‌ها و با استفاده از عبارت (۲۰) مدل غیرقطعی مثال فوق را به یک مدل قطعی تبدیل شد.

برای حل مثال فوق، الگوریتم اولویت - محور پیشنهادی در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده شد. با در نظر گرفتن احتمال تقاطع  $P_c = 0/8$ ، احتمال جهش  $P_m = 0/15$  و همچنین تعداد جمعیت اولیه  $pop\ size = 50$  مثال فوق حل گردید که نتایج آن در جداول ۱۱ تا ۹ ارائه داده شده است.

جدول ۱۱. استراتژی حمل و نقل از مراکز برگشت به مراکز جداسازی برای محصول  $\Theta$ 

مراکز برگشت	مراکز جداسازی			
	1	2	3	4
1	-	30	5	-
2	-	-	15	-
3	25	-	-	-

جدول ۱۲. استراتژی حمل و نقل از مراکز جداسازی به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای قطعه A

مراکز جداسازی	مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی			
	1	2	3	4
1	-	-	-	25
2	-	20	-	10
3	-	20	-	-
4	-	-	-	-

جدول ۱۳. استراتژی حمل و نقل از مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی به مراکز تولید برای قطعه A.

مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی	مراکز تولید	
	1	2
1	-	-
2	8	32
3	-	-
4	35	-

جدول ۱۴. استراتژی حمل و نقل از مراکز جداسازی به مراکز بازیافت برای قطعه C

مراکز جداسازی	مراکز بازیافت	
	1	2
1	22	11
2	-	-
3	-	-
4	-	-

جدول ۱۵. استراتژی حمل و نقل از مراکز برگشت به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای محصول \*

مراکز برگشت	مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی			
	1	2	3	4
1	-	20	-	-
2	14	-	-	-
3	1	-	-	19

جدول ۱۶. استراتژی حمل و نقل از مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی به مراکز بازیافت برای محصول \*

مراکز بازیافت	مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی	
	1	2
1	-	15
2	20	-
3	-	-
4	2	17

جدول ۱۷. استراتژی حمل و نقل از مراکز برگشت به مراکز جداسازی برای محصول Δ

مراکز برگشت	مراکز جداسازی			
	1	2	3	4
1	-	-	-	49
2	20	-	-	-
3	50	-	-	-

جدول ۱۸. استراتژی حمل و نقل از مراکز جداسازی به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای قطعه B

مراکز جداسازی	مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی			
	1	2	3	4
1	20	-	50	-
2	-	-	-	-
3	-	-	-	-
4	15	-	-	34

جدول ۱۹. استراتژی حمل و نقل از مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی به مراکز تولید برای قطعه B

مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی	مراکز تولید	
	1	2
1	-	35
2	-	-
3	50	-
4	4	30

همان‌طور که در جداول ۱۱ تا ۱۹ مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه حد مجاز برای احداث مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی ۳ می‌باشد، ۳ مرکز جداسازی و ۲ مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای قطعه A، ۲ مرکز جداسازی و ۳ مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای قطعه B، ۱ مرکز جداسازی برای قطعه C و ۳ مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی برای محصول \* احداث می‌شود.

روش حل مسأله که در این مثال ارائه شد، برای مسائل لجستیک معکوس با اندازه بزرگ در شرایط واقعی و در محیط غیرقطعی، قابل استفاده است.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای شبکه لجستیک معکوس برای محصولات برگشتی ارائه شده است که هدف از آن، کمینه‌سازی هزینه‌های استقرار و احداث تسهیلات و همچنین کمینه‌سازی هزینه‌های حمل و نقل و جریان مواد بین تسهیلات با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و همچنین در حالت چند محصولی است. مدل ارائه شده مشخص می‌کند کدام یک از مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی باز شوند و همچنین بهترین استراتژی حمل و نقل محصولات و قطعات مورد تقاضای مراکز کارخانه و مراکز بازیافت - که کمترین هزینه ثابت و کمترین هزینه حمل و نقل را داشته باشند - چیست. در این بخش قصد نداریم در مورد ویژگی‌های مدل ارائه شده بحث کنیم بلکه هدف، در این بخش، بررسی و نتایج به دست آمده از حل مدل می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از حل مدل، چند محصولی بودن مدل و همچنین در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت به منظور انطباق با عالم واقعیت و همچنین در نظر گرفتن شرایط حمل و نقل خاص (بعضی محصولات که نیاز به جداسازی ندارند، مستقیماً از مراکز برگشت به مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی منتقل می‌شوند، بعضی قطعات مستقیماً از مراکز جداسازی به مراکز بازیافت منتقل می‌شوند).

## منابع

۱. غضنفری، مهدی. فتح اله، مهدی(۱۳۸۵)، «نگرشی جامع بر مدیریت زنجیره تأمین»، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
2. Altiparmak,F., Gen,M., Lin,L., Karaoglan,I.( 2009), “A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design”, *Computers & Industrial Engineering*, 56, 521–537.
3. Altiparmak,F., Gen,M., Lin,L., Paksoy,T.( 2006), “A genetic algorithm for multi-objective optimization of supply chain networks”, *Computers & Industrial Engineering*, 51, 197–216.
4. Barros,A,I., Dekker,R., Scholten,V.( 1998), “ A two-level network for recycling sand: a case study”, *European Journal of Operational Research*,110, 199–214.
5. Frota Neto, j,Q., Bloemhof,j., van Nunen A,A,E.,van Heck, E.( 2008), “Designing and evaluating sustainable logistics network”, *International journal of production Economics*, 111, 195-208.
6. Gen,M., Altiparmak,F., Lin,L.( 2006), “A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding”, *OR Spectrum*,28,(3) ,337–354.
7. Gen,M., Cheng, R.( 2000), “Genetic algorithms and engineering optimization”, New York, John Wiley and Sons.
8. Jayaraman,V., Patterson,R,A., Rolland ,E.( 2003), “The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures”, *European Journal of Operational Research*, 150, 128–149.
9. Jayaraman,V.,Guide,V,D,R,J., Srivastava,R.( 1999), “A closed loop logistics model for remanufacturing”, *Journal of the Operational Research Society* ,50, (5), 497–508.
10. Kim,K., Song,I., Kim,J., Jeong,B.( 2006), “Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment”, *Computers & Industrial Engineering*, 51, (2), 279–287.
11. Kirkke, H,R., Harten,A,V., Schuur ,P,C.( 1999), “Business case Oce: reverse logistic network redesign for copiers”, *OR Spectrum* , 21, 381–409.
12. Kroon,L., Vrijens,G.( 1995), “Returnable containers: An example of reverse logistics”, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*”,25,(2), 56–68.
13. lee,J., Gen,M., Rhee,k. (2009), “Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm”, *computers & Industrial Engineering* , 56, 951-946.
14. Lu,Z., Bostel,N.(2007) , “A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities”, *Computers & Operations Research*, 34, 299–323.
15. Michalewicz, Z., Vignaux ,G,A., Hobbs,M.( 1991), “A non-standard genetic algorithm for the nonlinear transportation problem”, *ORSA Journal on Computing*, 3, (4), 307–316.
16. Min, H., Ko,H,J., Park,B,I.( 2005), “A lagrangian relaxation heuristic for solving the multi-echelon, multi-commodity, closed-loop supply chain network design problem”, *International Journal of Logistics Systems and Management*, 1, (4), 382–404.

17. Min,H., Ko,H,J., Ko,C,S.( 2006), “A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns”, *Omega*, 34, 56 – 69.
18. Pati, R, K., Vrat,P., Kumar,P.( 2008), “A goal programming model for paper recycling system”, The *International Journal of Management Science*, Omega, 36,(3), 405–417.
19. Pishvae, M ,S., Zanjirani, Farahani, R., Dullaert, W. (2010),”A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design”, *Computers & Operations Research*, 37, 1100–1112.
20. Syarif,A.,Yun,Y,S.,Gen.M.(2002), “study on multi-stage logistic chain network: a spanning tree-based genetic algorithm approach”, *Computers & Industrial Engineering*, 43, 299-314.
21. Uster,H., Easwaran,G., Elif Akcali,E., Sila Cetinkaya,S.( 2007), “benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model”, *Naval Research Logistics*, 54, 890-907.
22. Xu,J., Liu,Q., Wang,R.( 2008), “A class of multi-objective supply chain networks optimal model under random fuzzy environment and its application to the industry of Chinese liquor”, *Information Sciences*”, 178, 2022–2043.