

ارائه یک مدل چند هدفه لجستیک معکوس با در نظر گرفتن تخفیف

مریم عزیزی*، ابوالفضل کاظمی**، علیرضا علی نژاد***

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱۹

چکیده

رویکرد و نگرش جدیدی پیرامون موضوع لجستیک تحت عنوان لجستیک معکوس به وجود آمده است که یکی از گرایش‌های جدید در مدیریت لجستیک، بازیافت^۱، چرخه مجدد^۲ و یا استفاده مجدد از محصولات است. طراحی شبکه لجستیک در حالت رو به جلو و معکوس از موضوعات بسیار مهمی است که بعد استراتژیک طراحی زنجیره تامین را تشکیل می‌دهد. در این مقاله، برای مسئله لجستیک معکوس یک مدل ریاضی برنامه ریزی مختلط عدد صحیح (MILP) ارائه شده است. در این مدل هزینه های احداث مراکز، هزینه های حمل و نقل و هزینه های خرید از تامین کننده خارجی کمینه و همچنین اهمیت تامین کنندگان خارجی نیز بیشینه گردیده است. با توجه به اینکه مدل پیشنهادی $Np-hard$ می باشد، لذا جهت حل مدل از الگوریتمهای NSGA-II و NPGA استفاده شده است.

واژگان کلیدی: زنجیره تامین، لجستیک معکوس، مدل چندهدفه، شرایط عدم قطعیت، تخفیف.

* کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات قزوین، قزوین، ایران

** استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
(نویسنده مسئول). abkaazemi@qiau.ac.ir

*** دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

مقدمه

لجستیک معکوس، حرکت اقلام برگشتی در خلاف جهت عادی کالاها، در سیستم لجستیک است. این موضوع، علاوه بر پوشش دادن انواع اقلام برگشتی، طرق مختلف بازیافت و پاکسازی مواد زاید را از فرآیندهای تولید، توزیع و بسته بندی، نیز در بر می گیرد. وقتی مواد زاید، در تولید محصولات دیگر قابل استفاده نباشند، باید به طریقی آنها را دفع کرد. همچنین تمام محصولات فرعی تولید، باید توسط فرآیند لجستیک به صورت کارا و اثر بخش، جابجا، حمل و نقل و نگهداری شوند. لجستیک معکوس، به مشتریان اطمینان می دهد که انعطاف پذیری تولید کننده در برابر تقاضای آنها افزایش یافته و اقلام برگشتی آسان تر پذیرفته می شوند و نیز نشان دهنده اهمیت یافتن بازیافت و سایر موضوعات مرتبط با محیط زیست در نزد تولید کننده و لجستیک پشتیبان آن است (غضنفری و فتح اله، ۱۳۸۵).

تامین کنندگان خارجی یکی از اعضای مهم لجستیک های معکوس و شبکه های حلقه بسته زنجیره تامین هستند. اگرچه در مدل های شبکه^۱ CLSC، تامین کنندگان بر اساس هزینه خرید ارزیابی می شوند و دیگر فاکتورهایی نظیر تحویل به موقع نادیده گرفته می شوند. تامین کننده قیمت تخفیفات را روی کمیت یا تنوع محصولات خریداری شده از آنها اختصاص نمی دهد بلکه روی کل حجم کسب و کار ارائه می دهد. معمولاً تامین کنندگان برای تشویق خریداران برای خرید بیشتر از آنها تخفیف را در مقدار خرید لحاظ می کنند. در این صورت، خریدار باید در مورد میزان سفارش به هر تامین کننده تصمیم بگیرد (Amid, 2006). دلیل استفاده از طرح های تخفیفاتی، ناشی از این حقیقت است که خریداران به خرید مقادیر بیشتر تشویق شوند و هزینه های شبکه کاهش یابد. خریداران باید تصمیم بگیرند که چه مقدار سفارش به هر تامین کننده تخصیص دهند تا از تخفیفات پیشنهادی آنها بهره مند شوند. در واقع هزینه کل خرید تنها بستگی به قیمت واحد اقلام دارد و قیمت مجاز اقلام معمولاً در طرح های تخفیفی می تواند دیده شود. در مطالعات مربوط در این زمینه دیده شده که تامین کنندگان انواع گوناگونی از مدل های تخفیف را ارائه می دهند، بنابراین مسئله انتخاب تامین کننده چند

هدفه با در نظر گرفتن تخفیف پیچیده تر می شود. معمولاً دو نوع از تخفیف، تخفیف کلی و تخفیف نمودی جهت کاهش قیمت بیشتر استفاده می شود (Benton, 1996). هدف از این تحقیق ارائه یک مدل دو هدفه در لجستیک معکوس و زنجیره تامین حلقه می باشد و نیز با توجه به اینکه این نوع مسائل به دلیل پیچیدگی در محدودیتها و متغیرهای مسئله، در مجموعه مسائل NP-Hard قرار می گیرند، لذا برای حل این مدل پیشنهادی از الگوریتم های فراابتکاری استفاده شده است. در این تحقیق، یک شبکه لجستیک معکوس ارائه می گردد که شامل مراکز برگشت، دمونتاژ، نوسازی، تولید، بازیافت و دفع است. برای این منظور یک مدل برنامه ریزی خطی چند هدفه عدد صحیح مختلط پیشنهاد می شود که در آن به کمینه سازی هزینه ها اعم از احداث تسهیلات و حمل و نقل و خرید که در مواقع لزوم از تامین کننده خارجی با در نظر گرفتن تخفیف صورت می پذیرد، پرداخته خواهد شد و سپس مدل حاضر با استفاده از الگوریتمهای فراابتکاری حل می شود.

بقیه مقاله به صورت زیرسازماندهی شده است: ابتدا در بخش دوم به مروری جزئی بر مطالعات انجام شده پرداخته می شود. در بخش بعد، تعریف مسئله بیان می شود و در ادامه، مدل برنامه ریزی خطی چندهدفه ارائه می گردد. در بخش پایانی نیز، یک مثال عددی و نتایج آورده می شود.

مرور ادبیات و پیشینه تحقیق

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 اندرکاران عرصه تولید و تجارت قرار گیرد. در همین راستا، رویکرد و نگرش جدیدی پیرامون موضوع لجستیک تحت عنوان لجستیک معکوس به وجود آمده است. بر این اساس دسته بندی محصولات مرجوعی در سال ۲۰۰۲ توسط Fleischmann و روشهای اصلی قابل انتخاب برای بازیابی نیز توسط Thierry و همکاران در سال ۲۰۰۴، صورت گرفت که در انتها چهار نوع اصلی از شبکههای پایه R.L را در یک تقسیم بندی

جامع ارائه کردند: شبکه مستقیم بازیابی محصولات قابل استفاده (DRN)، شبکه نوسازی یا تولید دوباره (RMN)، شبکه خدمات تعمیرات (RSN) و شبکه بازیافت (RN).
 سال ۱۹۹۹، Jayaraman و همکاران 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 که هدف از آن، طراحی یک سیستم کشتی بر اساس تقاضای مشتریان است (Jayaraman V. S., 1999).

Fleischmann و همکاران در سال ۲۰۰۰ عنوان نمودند که غیر قطعی بودن یک ویژگی مهم بازیافت محصول است (Fleischmann M. H., 2000). تقاضای غیر قطعی و عدم قطعیت در نوع و مقدار محصولات بازگشتی مهم‌ترین فاکتور هستند که باید در طراحی شبکه‌های لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته در نظر گرفته شوند. در تمامی مدل‌های لجستیک معکوس، فعالیت‌های تولید مجدد و استفاده مجدد، مرمت و تعمیر و نیز بازیافت از فعالیت‌های عمده به شمار می‌روند.

لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ یک مدل ریاضی سیستم تولید مجدد را به صورت مدل شبکه لجستیک معکوس چندمرحله‌ای، چندمحصولی برای کمینه‌سازی کل هزینه‌های حمل و نقل لجستیک معکوس و هزینه ثابت احداث مراکز دمونتاز و مراکز پردازش، فرموله می‌کنند. برای حل این مسئله، یک الگوریتم ژنتیک به همراه روش کدگذاری مبتنی بر اولویت پیشنهاد می‌شود. پیشوایی و همکاران در سال ۲۰۱۰ نیز یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی یک شبکه ترکیبی ارائه دادند. در این مسئله برای جلوگیری از هزینه اضافی و صرفه‌جویی فرض شده است که احیای محصولات برگشتی در مراکز تولید انجام می‌شود. امین و ژانگ ۲۰۱۲ مدلی مشابه با مدل موجود در این مقاله را مورد بررسی قرار داده‌اند که با استفاده از روش Branch & Bound در نرم‌افزارهای تجاری حل مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی به حل مدل پرداخته‌اند.

عالم تبریز و همکاران در سال ۱۳۹۰ یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته احتمالی برای طراحی شبکه لجستیک معکوس ارائه دادند. مدل مورد نظر با در نظر گرفتن کمینه سازی هزینه ها (هزینه های استقرار تسهیلات و هزینه های حمل و نقل) 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 می یابد. همچنین یک روش کارا با استفاده از الگوریتم ژنتیک با کدینگ اولویت محور پیشنهاد دادند.

تارخ و همکاران در سال ۱۳۹۱ یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه لجستیک یکپارچه پیشرو/ معکوس چندلایه، چندمحصولی، تک دوره ای به همراه ظرفیتهای محدود شده و با شرایط نبود قطعیت و هدف کمینه سازی هزینه های کل شبکه ارائه دادند که به طور همزمان گزینه های بازیابی، تعمیر، تولید دوباره و همچنین گزینه دفع ضایعات را در برمی گیرد. توکلی مقدم و همکاران نیز در سال ۱۳۹۲ به مدلسازی ریاضی شبکه لجستیک مستقیم و معکوس با هدف کمینه سازی هزینه های ثابت و جریان مواد پرداختند که در ادامه مدل را با نرم افزار لینگو حل و تحلیل کردند.

در اکثر مطالعات مشابه ذکر شده به طراحی شبکه لجستیک معکوس پرداخته و کاهش هزینه به عنوان اولویت اهداف در نظر گرفته شده است. اما در مقالات بررسی شده موردی که در آن تخفیف برای مسئله لجستیک معکوس با چندین هدف و محدودیت در نظر گرفته شده باشد، مشاهده نگردید. چکیده ای از تحقیقات انجام شده در زمینه لجستیک معکوس در جدول ۱ ارائه شده است. لذا در مقاله حاضر با توجه به جدول ۱، به ارائه مدل مذکور با توجه به شرایط تخفیف هنگام خرید از تامین کننده خارجی حین فرآیند تولید مجدد محصولات پرداخته می شود و نیز با در نظر گرفتن ماهیت چند هدفه بودن مدل با الگوریتم های فراابتکاری به حل مدل پرداخته تا در مقایسه با مقالات زیر به نقطه بهینگی مطلوب رسیده شود.

تعریف مسأله

در این تحقیق، مدل شبکه لجستیک معکوس برای محصولات برگشتی با هدف حداقل سازی هزینه های احداث مراکز و هزینه های خود مراکز کنترل مرتب سازی (نوسازی) و واحد جداسازی (دمونتاژ) و واحد بازیافت (دفع) و حداقل سازی هزینه های حمل و نقل بین مراکز و همچنین هزینه خرید از تامین کننده خارجی در بازه تخفیف در نظر گرفته شده است و هدف بعدی بیشینه کردن اهمیت تامین کنندگان خارجی است. 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.

بیشتر پژوهشهای انجام شده در حوزه انتخاب تامین کننده برای موقعیت های خرید تک محصولی طراحی شده اند و معمولاً به دلیل جلوگیری از پیچیده شدن محاسبات ریاضی، تخفیف نادیده گرفته شده، یا تنها یک نوع تخفیف در نظر گرفته می شود، در حالی که در واقعیت تامین کنندگان می توانند شرایط تخفیف دلخواه را بیان و مشخصات خود را اعلام کنند و خریدار با توجه به موقعیت خود بهترین گزینه ها را انتخاب کند. بنابراین در این مدل سعی بر آن است که شرایط تخفیف را به گونه ای در هنگام خرید از تامین کننده خارجی حین فرآیند تولید مجدد محصولات در نظر گرفته شود.

مفروضات

مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش با توجه به فرضیه های زیر طراحی و حل شده است:

- اگر مقدار قطعات ارائه شده از مکان نوسازی برای نیاز تولید کننده کافی نیست، تولید کننده باید قطعات را از تامین کنندگان خارجی فراهم کند.
- افزایش ظرفیت مکانهای دمونتاژ و نوسازی و تامین کنندگان شناسایی می شوند.
- تقاضای مراکز تولید و مراکز بازیافت، به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است.

مدل سازی ریاضی

اندیسها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و تابع هدف مدل ریاضی ارائه شده برای شبکه لجستیک معکوس به شرح زیر است:

اندیس ها

- 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 مرتب سازی ($k \in K$)
- F : مجموعه نقاط ثابت مراکز تولید ($f \in F$)
- R : مجموعه نقاط ثابت مراکز بازیافت ($r \in R$)
- P : مجموعه محصولات ($p \in P$)
- M : مجموعه قطعات ($m \in M$)
- S : مجموعه تامین کنندگان ($s \in S$)
- T : دوره ($t \in T$)
- E : سطوح تخفیف ($e \in E(m, s)$)

پارامترها

در این بخش پارامترهای مسئله که در مدل به کار گرفته شده اند که برای هر تامین کننده و هر محصول و قطعه و هر سطح تخفیف دارای مقادیر متفاوتی است، عبارتند از:

- m : منبع مصرفی برای دمونتازیک واحد از قطعه Rud_m
- RuR_{mk} : منبع مصرفی برای نوسازی یک واحد از قطعه m در محل نوسازی k
- Ru_{ms} : منبع داخلی مورد استفاده از تامین کننده خارجی S برای تولید یک واحد قطعه m
- $Mcap_{mt}$: حداکثر ظرفیت محل دمونتاز قطعه دمونتاز m در دوره زمانی t

$Mcap_{mkt}$: حداکثر ظرفیت محل نوسازی k برای نوسازی قطعه m در دوره زمانی t

$Mcap_{st}$: حداکثر ظرفیت ذخیره تامین کننده خارجی s ام در دوره زمانی t

$Cap1_{ipt}$: ظرفیت مرکز برگشت i برای محصول p در دوره زمانی t

$Cap2_{jmt}$: ظرفیت مرکز جداسازی j برای قطعه m در دوره زمانی t

$Cap3_{kmt}$: ظرفیت مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی (نوسازی) k برای قطعه m در

دوره زمانی t

V_{st} : حداقل مقدار خریداری از تامین کننده s ام در دوره زمانی t

UM_m : حداکثر درصد قطعه m قابل استفاده مجدد

WI_{ms} : اهمیت وزن تامین کننده s برای قطعه m

n_{mp} : تعداد قطعات m بوجود آمده از جداسازی یک محصول p

DP_{fmt} : تقاضای مرکز تولید f برای قطعه m در دوره زمانی t

DB_{rpt} : تقاضای مرکز بازیافت r برای محصول p در دوره زمانی t

DR_{rmt} : تقاضای مرکز بازیافت r برای قطعه m در دوره زمانی t

CD_{mt} : هزینه واحد دمونتاژ برای قطعه m در دوره زمانی t

Cd_{mt} : هزینه واحد دفع برای قطعه m در دوره زمانی t

CR_{mkt} : هزینه واحد نوسازی (بازسازی) برای قطعه m در محل نوسازی k در دوره زمانی t

CB_{mest} : هزینه قطعه خریداری شده m در بازه تخفیف e ام از تامین کننده خارجی s ام در

دوره زمانی t

CRJ_{ijpt} : هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد از محصول p از مرکز برگشت i به مرکز

جداسازی j در دوره زمانی t

CRR_{ikpt} : هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد محصول p از مرکز برگشت i به مرکز

کنترل و تمیزکاری و مرتب‌سازی (نوسازی) k در دوره زمانی t

CJR_{jkmt} : هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد قطعه m از مرکز جداسازی j به مرکز

کنترل و تمیزکاری و مرتب‌سازی (نوسازی) k در دوره زمانی t

CBR_{krmt} : هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد قطعه m از مرکز بازیافت r به مرکز کنترل و تمیز کاری و مرتب سازی (نوسازی) k در دوره زمانی t

CPR_{kfmt} : هزینه حمل و نقل و جابجایی یک واحد قطعه m از مرکز تولید f به مرکز کنترل و تمیز کاری و مرتب سازی (نوسازی) k در دوره زمانی t

CJ_{jm}^{wc} : هزینه ثابت احداث مرکز جداسازی j برای قطعه m

CR_{mk}^{wc} : هزینه ثابت احداث مرکز کنترل، تمیز کاری مرتب سازی (نوسازی) k برای قطعه m

B_{mest} : حد بالای سطح تخفیف e از بازه تخفیف تامین کننده s در دوره زمانی t

۵-۳- متغیر تصمیم

متغیرهای مسئله برای مدل ارائه شده عبارتند از:

UP_{mest} : واحدهای قطعه m که در بازه تخفیف e ام از تامین کننده خارجی s ام در دوره زمانی t خریداری شده است.

$UPD2_{mk}$: واحدهای قطعه m که از محل دمونتاژ (جداسازی) در دوره زمانی t بدست آمده اند.

UPR_{mkt} : واحدهای قطعه m که از محل نوسازی (کنترل مرتب سازی) k در دوره زمانی t نوسازی شده اند.

$UPD1_{mt}$: واحدهای قطعه m که در دوره زمانی t دفع شده اند.

fRJ_{ijpt} : مقدار جریان محصول p از مرکز برگشت i به مرکز جداسازی (دمونتاژ) j در دوره زمانی t

fRR_{ikpt} : مقدار جریان محصول p از مرکز برگشت i به مرکز کنترل، تمیز کاری و مرتب سازی (نوسازی) k در دوره زمانی t

fJR_{jkmt} : مقدار جریان قطعه m از مرکز جداسازی j به مرکز کنترل، تمیز کاری و مرتب سازی (نوسازی) k در دوره زمانی t

fJB_{jrm} : مقدار جریان قطعه m از مرکز جداسازی j به مرکز بازیافت r در دوره زمانی t

fRB_{kfmt} : مقدار جریان قطعه m از مرکز کنترل، تمیز کاری و مرتب سازی (نوسازی) k به مرکز تولید f در دوره زمانی t

fRB_{krmt} : مقدار جریان قطعه m از مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی (نوسازی) k به مرکز بازیافت r در دوره زمانی t

y_{jm} : اگر مرکز جداسازی j برای قطعه m احداث گردد 1 و در غیر این صورت 0

X_{mk} : اگر مرکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی (نوسازی) k برای قطعه m احداث گردد 1 و در غیر این صورت 0

U_{st} : متغیر باینری برای تامین کننده s

ضریب تخفیف مربوط به بازه تخفیف Z_{mest} :

تابع هدف

در این تحقیق دو تابع هدف در مدل در نظر گرفته شده است که در زیر به توضیح آن پرداخته می‌شود:

مینیمم سازی هزینه

همزمان هزینه‌های احداث (مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی) و هزینه‌های خود مراکز کنترل مرتب‌سازی (نوسازی) و واحد جداسازی (دمونتاژ) و واحد های بازیافت و دفع و هزینه‌های جابجایی و حمل و نقل محصولات و قطعات بین مراکز و هزینه خرید از تأمین کننده خارجی در بازه تخفیف را کمینه می‌کند.

تابع هدف هزینه به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$MinZ_1 = \sum_{m=1}^M \sum_{e=1}^{E(m,s)} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T CB_{mest} UP_{mest} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T CD_{mt} UPD2_{mt} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T CR_{kmt} UPR_{kmt} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T Cd_{mt} UPD1_{mt} +$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M C J_{jm}^{wc} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M C R_{mk}^{wc} x_{mk} + \\
 & \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C R J_{ijpt} \cdot f R J_{ijpt} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C R R_{ikpt} \cdot f R R_{ikpt} + \\
 & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T C J R_{jkmt} \cdot f J R_{jkmt} + \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T C B J_{jrmt} \cdot f J B_{jrmt} + \\
 & \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T C P R_{kfnt} \cdot f R P_{kfnt} + \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T C B R_{krmt} \cdot f R B_{krmt}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

بیشینه سازی سطح اهمیت تامین کنندگان خارجی:

تابع هدف زیر اهمیت تامین کنندگان خارجی را بیشینه می کند که شامل حاصلضرب اوزان تامین کنندگان خارجی در مقدار قطعات خریداری شده از آنها حاصل می شود.

$$\begin{aligned}
 \text{Max} Z_2 = & \sum_{m=1}^M \sum_{e=1}^{e(m,s)} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T W I_{ms} \cdot U P_{mest}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

محدودیت های مدل:

Subject to:

$$u_{s,v_{st}} \leq \sum_{m=1}^M \sum_{e=1}^{e(m,s)} R u_{ms} \cdot U P_{mest} \leq u_s \cdot M c a p_{st} \quad \forall s, t
 \tag{3}$$

این محدودیت، محدودیت ظرفیت می باشد که بیانگر حداقل مقدار خریداری از تامین کنندگان و حداکثر ظرفیت تامین کننده خارجی است.

$$\sum_{k=1}^K U P R_{mkt} + U P D 1_{mt} = U P D 2_{mt} \quad \forall m, t
 \tag{4}$$

این محدودیت، تعادل محصولات و قطعات است که بیان می کند تعداد قطعات دمونتاز شده برابر با تعداد قطعات و ضایعات قابل استفاده مجدد می باشد.

$$Rud_m UPD2_{mt} \leq Mcap_{mt} \quad \forall m,t \quad (5)$$

$$Rur_{mk} UPR_{mkt} \leq Mcap_{mkt} x_{mk} \quad \forall m,k,t \quad (6)$$

محدودیت های (۵) و (۶) حداکثر درصد قطعات و ضایعات قابل استفاده مجدد را منعکس می کند.

$$\sum_{j=1}^J fRJ_{ijpt} \leq cap1_{ipt}, \quad \forall i, p, t \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K fRR_{ikpt} \leq cap1_{ipt}, \quad \forall i, p, t \quad (8)$$

محدودیت های (۷) و (۸) محدودیت های ظرفیت مراکز برگشت هستند که بیان می دارند مقدار محصولات ارسالی از هر مرکز برگشت به مراکز جداسازی و مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب سازی باید کوچکتر یا مساوی با ظرفیت آن مرکز برگشت برای هر محصول باشد.

$$\sum_{k=1}^K fJR_{jkmt} \leq cap2_{jmt} y_{jm}, \quad \forall j, m, t \quad (9)$$

$$\sum_{r=1}^R fJB_{jmt} \leq cap2_{jmt} y_{jm}, \quad \forall j, m, t \quad (10)$$

محدودیت های (۹) و (۱۰) محدودیت های ظرفیت مراکز جداسازی هستند که 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.

$$\sum_{r=1}^R fRB_{krmt} \leq cap3_{kmt} x_{mk}, \forall k, m, t \quad (11)$$

$$\sum_{f=1}^F fRP_{kfnt} \leq cap3_{kmt} x_{mk}, \forall k, m, t$$

(۱۲)

محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) محدودیت‌های ظرفیت مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب‌سازی هستند که بیان می‌کنند 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.

$$\sum_{k=1}^K UPR_{mkt} \leq u_m UPD2_{mt}, \forall m, t \quad (13)$$

$$UPD1_{mt} \leq (1-u_m)UPD2_{mt}, \forall m, t \quad (14)$$

محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) محدودیت‌های مکان‌های دمونتازو نوسازی هستند که بیانگر حداکثر ظرفیت مکان‌های دمونتازو و نوسازی در دوره زمانی هستند.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R fJB_{jrmt} \leq n_{mp} \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J fRJ_{ijpt} \right) \forall m, p, t \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K fJR_{jkmt} \leq n_{mp} \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J fRJ_{ijpt} \right) \forall m, p, t \quad (16)$$

محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) محدودیت‌های تعادل محصولات و قطعات هستند که تعادل جریان قطعات به دست آمده از جداسازی محصولات است. n_{mp} ضریب تبدیل می‌باشد.

$$\left(\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K fJR_{jkmt} \geq \sum_{f=1}^F DP_{fmt} \right) \forall m, t \quad (17)$$

$$\left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (fRR_{ikpt} \geq \sum_{r=1}^R DB_{rpt}) \right) \forall p, t \quad (18)$$

محدودیت های (۱۷) و (۱۸) این محدودیت ها نشان می دهند که

محصولات و قطعاتی که از مرکز برگشت و مرکز جداسازی به سمت مراکز کنترل، تمیزکاری و مرتب سازی حمل می شوند، از طرف تقاضای تولید و مراکز بازیافت به صورت کششی هستند.

$$\left(\sum_{k=1}^K fRP_{kfmt} \geq DP_{fmt} \right), \forall f, m, t \quad (19)$$

$$\left(\sum_{k=1}^K fRB_{krpt} \geq DB_{rpt} \right), \forall r, p, t \quad (20)$$

$$\left(\sum_{j=1}^J fJB_{jrmt} \geq DR_{rmt} \right), \forall r, m, t \quad (21)$$

$$\left(\sum_{e=1}^{E(m,s)} \sum_{s=1}^S UP_{mest} \geq \sum_{f=1}^F DP_{fmt} \right) \forall m, t \quad (22)$$

محدودیت های (۱۹) و (۲۰) و (۲۱) و (۲۲) محدودیتهای تقاضای محصولات و قطعات هستند که نشان دهنده میزان تقاضای مراکز تولید برای قطعات و میزان تقاضای مراکز بازیافت برای محصولات و میزان تقاضای مراکز بازیافت برای قطعات می باشد و در نهایت میزان تقاضای مراکز تولید از تامین کننده خارجی می باشد.

$$B_{m(e-1)st} Z_{mest} \leq UP_{mest} \leq B_{mest} Z_{mest}, \forall m, e, s, t \quad (23)$$

$$\sum_{e=1}^{E(m,s,t)} Z_{mest} \leq 1, \forall s, t \quad (24)$$

$$Z_{mest} \begin{cases} 0 \xrightarrow{if} Z_{mest} = 0 \\ 1 \xrightarrow{if} Z_{mest} > 0 \end{cases} \quad (25)$$

$$m=1, 2, \dots, M, e=1, 2, \dots, E(m,s), s=1, 2, \dots, S$$

محدودیت های (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) تخفیف هستند، از آن جایی که هر تامین کننده تخفیف را ارائه می دهد، بنابراین نیاز است که محدودیتی به نام محدودیت تخفیف در مدل لحاظ شود تا بسنجد مقدار خرید از تامین کننده S برای محصول p یا قطعه m در سطح تخفیف e، در آن سطح تخفیف صدق می کند.

$$\begin{aligned} &fRJ_{ijpt}, fRR_{ikpt}, fJR_{jkmt}, fJB_{jrmt}, \\ &fRP_{kfnt}, fRB_{krmt}, UP_{mest}, UPD1_{mt}, \\ &UPD2_{mt}, UPR_{mkt} \geq 0, \forall i, j, k, m, f, r, p, t \end{aligned} \quad (26)$$

$$y_{jm}, x_{mk}, u_{st} = \{0, 1\} \forall j, m, k, s, t \quad (27)$$

محدودیت های (۲۶) و (۲۷) محدودیت های منطقی و بدیهی مربوط به متغیرهای تصمیم هستند.

روش شناسی حل مسئله

شبکه لجستیک معکوس مورد بررسی در این تحقیق در دسته NP-Hard قرار دارد که برای حل آن در مقیاس های بزرگ نمی توان از روش های دقیق استفاده کرد. محققان برای حل این گونه مسائل، از روش های ابتکاری و فراابتکاری - که بر پایه بهینه سازی مسائل ترکیبی استوارند - استفاده می کنند (عالم تبریز و همکاران، ۱۳۹۰). در این مقاله ابتدا در مقیاس کوچک مسئله را با نرم افزار Lingo نسخه ۸ و الگوریتم فرا ابتکاری GA و سپس در مقیاس بزرگتر به خاطر NP-Hard بودن مسئله و قادر نبودن Lingo در بدست آوردن جواب، فقط از الگوریتم های فرا ابتکاری استفاده شده است. از بین الگوریتم های فرا ابتکاری به خاطر ماهیت چند هدفه بودن مسئله از الگوریتم فرا ابتکاری NSGA-II و NPGA در این تحقیق استفاده شده است.

الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب ها (NSGA-II)

الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) یکی از کارآمدترین و مشهورترین الگوریتم های بهینه سازی چند هدفه می باشد که توسط Deb و همکاران در سال ۲۰۰۰ ارائه شد. با توجه به اینکه الگوریتم های بهینه سازی تک هدفه، حل بهینه را با توجه به یک هدف می یابند و این در حالی است که در مسائل چند هدفه یک حل بهینه مجزا را نمی توان یافت. پس طبیعی است که با یک مجموعه ای از حل ها به نام حل های مغلوب نشده موثر سروکار داشته باشیم. از بین این مجموعه حل های متناهی حل مناسب جواب هایی خواهد بود که عملکرد قابل قبولی را نسبت به همه اهداف داشته باشد. حل مسائل چند هدفه با رویکرد پارتو از دسته مسائل پیچیده تر در حل مسائل چند هدفه می باشند. علت این است که معمولاً جواب بهینه خاصی برای این روش ها بدست نمی آید (Deb, 2001). در ادامه قدم های پیاده سازی الگوریتم (NSGA-II) تشریح می گردد.

۶-۱-۱- مقداردهی اولیه

اطلاعات اولیه برای شروع کار الگوریتم (NSGA-II) پیشنهادی به قرار زیر است:

- اندازه جمعیت اولیه (nPop)، که بیانگر تعداد کروموزوم هایی است که در هر مرحله باید نگهداری شوند.
- احتمال عملگر تقاطع (P_c)، که بیانگر تعداد والدینی است که در حوضچه جفت شرکت می کنند. جهت تولید فرزند جدید در هر تکرار از الگوریتم، عملگر تقاطع یکنواخت^۱ پیاده سازی شده است (Bate and Jones, 2007).
- احتمال عملگر جهش (P_m)، که بیانگر تعداد جواب هایی است که در فرآیند جهش شرکت می کنند.
- تعداد تکرار الگوریتم (nIt).

الگوریتم NPGA

الگوریتم NSGA در سال ۲۰۰۲ توسط آقای Deb معرفی گردید. اما به دلیل سرعت همگرایی پایین آن، جادن در سال ۲۰۰۸ میلادی الگوریتم NPGA را پیشنهاد کرد. الگوریتم NPGA بر اساس اصل عدم غلبه کردن، میزان فاصله ازدحامی و نخبه گرایی می باشد و نسبت به الگوریتم های مشابه، سریعتر و از پیچیدگی عملیاتی کمتری برخوردار است. در زیر مراحل اجرای الگوریتم NPGA آمده است.

- ۱- تولید نسل والدین تصادفی به تعداد N .
- ۲- مرتب نمودن نسل اولیه بر اساس جواب های نامغلوب با استفاده از محاسبه فاصله ازدحامی.
- ۳- برای هر جواب نامطلوب رتبه ای متناسب با تراز (فرانت) آن در نظر گرفته می شود (فرانت اول برای بهترین اعضا و فرانت دوم برای بهترین اعضای بعدی و به همین ترتیب....)
- ۴- انتخاب والدین بر اساس چرخ رولت.

- ۵- تولید نسل فرزندان به تعداد N با استفاده از عملگر انتخاب و جهش.
- ۶- با توجه به نسل اول تولید شده فوق که شامل کروموزومهای والدین و فرزندان می باشد نسل جدید زیر صورت می گیرد.
- ترکیب کروموزومهای والدین و فرزندان و تولید نسل (R_t) به تعداد $2N$.
- مرتب نمودن نسل R_t بر اساس دسته بندی های نامغلوب و شناسایی جبه های برتر.
- تولید نسل والدین برای تکرار بعد با استفاده از جبه های نامغلوب تولید شده به تعداد N .
- اعمال عملگرهای تزویج، جهش و بر روی نسل والد جدید تولید شده.
- نخبه گرایی (اعضای از نسل قبل که مغلوب نشده اند می توانند در تولید فرزندان شرکت کنند).
- انتخاب والدین برای تولید نسل بعدی با استفاده از چرخ رولت.
- تولید نسل فرزندان به تعداد n .
- ۷- تکرار مرحله ۶ تا دستیابی به تعداد کل تکرار مورد نظر.

ساختار کروموزوم

در این مسئله ۹ رشته کروموزومی داریم، رشته های کروموزومی مشتمل بر متغیرهای مستقل ما شامل fRP_{kfmt} ، fRR_{kfmt} ، fRR_{ikpt} ، fRJ_{ijpt} ، UPR_{mkt} ، UP_{mest} ، $UPD1_{mt}$ ، fJR_{jkmt} ، fJB_{jrmt} هستند که در مدل وارد کروموزوم می کنیم که به طور کلی ساختار جواب می گوئیم. برای مثال، ساختار کروموزوم موجود در متغیر $UPD1_{mt}$ دارای دو بعد می باشد که بعد اول نشان دهنده تعداد قطعات موجود و بعد دوم نشان دهنده دوره زمانی می باشد. بنابراین ساختار کروموزوم به صورت یک ماتریس $m * t$ می باشد که m بیانگر تعداد قطعات موجود در مسئله و t بیانگر دوره زمانی می باشد و در متغیرهای بعدی همگی دارای چهار بعد می باشند که بیان کننده تعداد قطعات و سطح تخفیف، تعداد مراکز نوسازی، برگشت، دمونتاژ و تولید، تعداد محصولات و تامین کنندگان و دوره زمانی هستند که ساختار کروموزوم به صورت ماتریس های $m * e * s * t$ و $i * j * p * t$ و $k * p * t$ و $m * k * t$ و $k * m * t$ و $j * z$ و $r * m * t$ و $k * f * m * t$ می باشند.

۸- حل مدل

در این بخش به حل مدل چند هدفه لجستیک معکوس با در نظر گرفتن تخفیف کلی، پرداخته شده است. از حل تک تک اهداف با کلیه محدودیت های مدل با استفاده از نرم افزار Lingo نسخه ۸ و الگوریتم ژنتیک و سپس مقادیر حد بالا و پائین برای هر هدف توسط رابطه (۲۸)، جداول (۲) و (۳) و (۴) حاصل شده است.

$$\text{Min} \left[w_1^p \left(\frac{z_1^- - z_1^+}{z_1^- - z_1^+} \right)^p + w_2^p \left(\frac{z_2^- - z_2^+}{z_2^- - z_2^+} \right)^p \right]^{1/p} \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)، w_1, w_2 عوامل وزنی هستند که توسط تصمیم گیرنده برای اهداف در نظر گرفته می شود ($w_k \geq 0$) به طوری که مجموع وزن اهداف برابر یک شود. به طور آشکارا، نتایج متفاوت بستگی به مقدار p دارد. به طور کلی p برابر ۱ یا ۲ است. اما دیگر مقادیر p نیز می تواند بکار رود.

جدول ۳: نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک

Z	Z ₁	Z ₂	λ
0.085	8878	55.5	1

جدول ۲: نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از نرم افزار

Z	Z ₁	Z ₂	λ
0.034545	78546.02	40	1

جدول ۴: مقادیر حد بالا و پائین برای هر هدف

	Z ₁	Z ₂
Z _k ⁺	5756	27.52
Z _k ⁻	55223	51.08

همانطور که مشاهده می شود پاسخ الگوریتم ژنتیک نیز به خوبی همگرا شده است و مقدار تابع هدف از حل الگوریتم ژنتیک، به مقدار بدست آمده از حل مدل توسط نرم افزار لینگو مطابق با جداول (۱) و (۲) بسیار نزدیک است.

مقایسه کارایی الگوریتم ها

هم گزایی به جواب های بهینه پارتو و فراهم نمودن چگالی و تنوع در میان مجموعه جواب های به دست آمده دو هدف اصلی هر الگوریتم تکاملی چند هدفه هستند ولی به دلیل اینکه دو هدف تا حدودی در تضاد با یکدیگرند، معیاری که بتواند به تنهایی و به صورت مطلق در مورد الگوریتم ها تصمیم بگیرد، وجود ندارد. اگر امکان دستیابی به چنین معیاری میسر بود، اظهار نظر در مورد برتری یک الگوریتم نسبت به الگوریتم دیگر امکان پذیر می گردید (خویشتن داره، فرزد، & زندیه، ۱۳۹۰). بنابراین الگوریتم های ارائه شده در این مقاله با معیارهای زیر مورد مقایسه قرار گرفته اند.

معیارهای مقایسه چند هدفه

۱- بیشترین گسترش^۱ - فاصله گذاری^۲ - فاصله از جواب ایده ال^۳ - تعداد جواب های پارتو^۴

۵- زمان اجرای الگوریتم^۵

نتایج مقایسه الگوریتم ها

به منظور مقایسه الگوریتم ها و شناسایی الگوریتم های کارا، هر یک از الگوریتم های طراحی شده ۱۲ بار اجرا شده و مقدار هر یک از معیارها در هر اجرا محاسبه گردیده است. نتایج محاسباتی حاصل از الگوریتم فرا ابتکاری NSGA-II و NPGA در سایزهای بزرگ به ترتیب در جداول (۵) و (۶) آورده شده است.

¹Diversity

²Spacing

³Mid

⁴Nos

⁵Time

جدول ۵: حل مدل توسط NSGA-II

Number	MID	Spacing	Diversity	NOS	Time (s)
1	110735040.73	16309063.45	98211449.11	100	183.36
2	84745194.104	3687778.37	29575559.17	85	204.05
3	83719919.44	1582765.466	21596358.23	83	216.30
4	108540647.7	6476841.91	80136785.25	86	262.33
5	110188445.38	1210476.68	43924367.20	45	325.22
6	184867409.69	1888569.29	26022749.27	64	299.65
7	216622076.41	14802524.82	101476246.6	46	386.24
8	262767759.99	3235168.96	142446988.4	64	402.74
9	241884110.73	5531732.81	53043953.04	74	462.52
10	231137231.06	3492480.96	91496788.88	93	509.62
11	37556688.02	471378.004	1095898.156	68	639.3
12	32218026.67	1324199.48	4002021.001	74	864.3
Average	142081879.2	5001081.683	57752430.36	73.5	396.302

جدول ۶- حل مدل توسط NPGA

Number	MID	Spacing	Diversity	NOS	Time (s)
1	210189916.59	762593.175	6284132.054	100	172.20
2	189581296.27	374058.18	7648330.627	90	192.55
3	164537385.19	733065.661	11159132.45	91	200.1
4	179443233.06	242036.519	7870903.015	75	233.25
5	204986828.63	860090.488	8297269.604	61	285.36
6	389773548.87	323959.871	13347687.43	85	336.3
7	411413791.19	1072897.601	20581617.67	63	294.3
8	426082315.12	1118861.116	25500747.21	80	326.5
9	470068733.38	909567.976	14998093.72	90	371.5
10	430496595.91	664486.484	20336705.63	85	417.8
11	163647791.71	67063.48	36488.287	85	499.3
12	151290165.00	78128.228	4021222.41	82	594.3

Average	282625966.7	600567.3983	11673527.51	82.2	326.955
Number	MID	Spacing	Diversity	NOS	Time (s)

همانطور که در جدول فوق نشان داده شده است سه شاخص Spacing، MID و Time مقادیر کمتر و برای دو شاخص Diversity و NOS مقادیر بیشتر از مطلوبیت بالاتری برخوردار هستند. همان طور که در ردیف انتهایی جداول محاسباتی نشان داده شده است معیارهای MID و Diversity در الگوریتم NSGA-II و معیارهای NOS، Spacing و Time در الگوریتم NPGA از مطلوبیت بالاتری برخوردارند.

نتیجه گیری

در این تحقیق، یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای شبکه لجستیک معکوس برای محصولات برگشتی ارائه شده است که هدف از آن، کمینه سازی هزینه ها اعم از احداث تسهیلات و حمل و نقل و جریان مواد بین تسهیلات و خرید از تامین کننده خارجی با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و تخفیف در خرید و همچنین در حالت چند محصولی است. از موضوعاتی که در تحقیقات آینده می تواند مورد توجه قرار بگیرد، می توان به توسعه مدل با اهداف زیست محیطی و سبز بودن و بهینه سازی پایدار اشاره کرد.

منابع

تارخ محمدجواد، گوکه مهسا، ترابی شهره، (۱۳۹۰). مدل کلی بهینه سازی طراحی شبکه لجستیک معکوس تحت عدم قطعیت. نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره ۴۶، شماره ۲، مهر ماه ۱۳۹۲، ۱۷۰-۱۵۹.

توکلی مقدم رضا، رکاوندی مجتبی، قدرت نما علی، (۱۳۹۲). مدل سازی ریاضی برای طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس. پژوهش های مدیریت در ایران، دوره ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۲.

خویشتن دار سهیلا، فرزد فرهاد، زندیه، مصطفی، (۱۳۹۰). ارائه الگوریتم تکاملی چند هدفه برای سیستم های موجودی احتمالی با مرور دائم. فصلنامه علمی - پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۰، ۸۱-۹۹.

عالم تبریز اکبر، روغنیان عماد، حسین زاده مصطفی، (۱۳۹۰). طراحی و بهینه سازی شبکه لجستیک معکوس در شرایط عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم ژنتیک. چشم انداز مدیریت صنعتی، ۱، ۶۱-۸۹.

غضنفری مهدی، فتح اله مهدی، (۱۳۸۵). «نگرشی جامع بر مدیریت زنجیره تأمین»، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

Amid, A. G. (2006). *Fuzzy multi-objective linear model for supplier selection in a supply chain*. International Journal of Production Economics, 104, 394-407.

Amin, H.S, Zhang, G. (2012). *An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach*. Expert Systems with Applications 39 (2012) 6782-6791.

Barros, A. D. (1998). *A two-level network for recycling sand: a case study*. European Journal of Operational Research, 110, 199-214.

Benton, W. P. (1996). *Classification of literature on determining the lot size under quantity discount*. European Journal of Operation Research, 92 (2), 219-238.

- Bate, S.T., Jones B. (2007). *A review of uniform crossover designs*. Journal of Statistical Planning and Inference, 138, 336-351.
- Deb, k. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. New York, NY: Wiley.
- Fleischmann, M. H. (2000). *A Characterization of logistics networks for product recovery*. Omega, 28 (6), 653-666.
- Fleischmann M, Kuik R, Dekker R. *Controlling inventories with stochastic item returns: a basic model*. European Journal of Operational Research 2002;138:63-75.
- Jayaraman, V. S. (1999). *A closed loop logistics model for remanufacturing*. Journal of the Operational Research Society, 50 (5), 497-508.
- Lee, J.E., Gen, M. and Rhee K.G. (2009). "Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm." Computers and Industrial Engineering, Vol. 56, PP. 951-964.
- Montgomery, D. (2004). *Response surface methodology*. New York: Willey.
- Omar Al Jadaan, Lakishmi Rajamani, C. R. Rao, "NONDOMINATED RANKED GENETIC ALGORITHM FOR SOLVING MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION PROBLEMS: NPGA," Journal of Theoretical and Applied Information Technology, vol. 4, no. 1, pp. 61-68, 2008.
- Pishvae M.R., Zanjirani Farahani R., Dollaert W., "A memetic algorithm for biobjective integrated forward/reverse logistics network design"; Computer and Operation Research, Vol. 37, 2010.
- Qin, Z. a. (2009). *Logistics network design for product recovery in fuzzy environment*. European Journal of Operational Research, 202, 479-490.
- Thierry, M., Salomon, M., van Nunen, J., van Wassenhove, L., 2004. *Strategic issues in product recovery management*. California Management, 37(2):114-135.