

مدلسازی ریاضی برای طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس

رضا توکلی مقدم^۱، مجتبی امیدری رکاوندی^۲، علی قدرت‌نما^۳

۱- استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۳- استاد یار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران

پذیرش: ۹۲/۹/۴

دریافت: ۹۱/۳/۲۰

چکیده

امروزه لجستیک معکوس یکی از عمده فعالیت‌های مدیریت زنجیره تأمین است که تمام فعالیت‌های فیزیکی مرتبط با محصولات برگشتی (مانند جمع‌آوری، احیا و بازیافت، دفن و انهدام) را در بر می‌گیرد. در این راستا طراحی و اجرای صحیح لجستیک معکوس علاوه بر افزایش سطح وفاداری مشتریان، موجب کاهش هزینه‌های موجودی و هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود. در این مقاله به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های مرتبط با هزینه‌های ثابت، هزینه‌های جریان مواد و هزینه‌های احداث مراکز بالقوه، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس ارائه می‌شود. برای اعتباردهی این مدل نیز چند نمونه مسئله آزمایشی تولید و سپس پارامترهای مدل تعیین می‌شود. مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار لینگو حل و نتایج محاسباتی برحسب مقدار تابع هدف و زمان مربوطه به همراه تحلیل حساسیت آن ارائه می‌گردد. همچنین نتایج برای محصولات برگشتی با تقاضای مختلف برای یک و دو محصول ارائه می‌شود. در خاتمه نتیجه‌گیری کلی ارائه خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت زنجیره تأمین، طراحی شبکه، لجستیک یکپارچه مستقیم و معکوس.

۱- مقدمه

لجستیک معکوس به دلیل مزیت‌های رقابتی فراوانی که با خود به همراه دارد، از محبوبیت

خاصی برخوردار است. قوانین زیست‌محیطی و منافع اقتصادی، آگاهی مصرف‌کنندگان و مسئولیت‌های اجتماعی در برابر محیط زیست از محرک‌های اساسی این حوزه می‌باشند [۱]، صص ۲۱-۴۰]. در قوانینی که به‌تازگی در کشورها به‌خصوص در اتحادیه اروپا به تصویب رسیده است، شرکت‌ها مسئول جمع‌آوری محصولات اسقاطی و برگشتی خود شناخته می‌شوند، زیرا در صورت عدم جمع‌آوری، احیا و بازیافت یا انهدام ایمن این محصولات، محیط‌زیست از آن‌ها متضرر خواهد شد [۲، صص ۵۶-۸۴]. در دهه اخیر بسیاری از شرکت‌های مهم مانند دل، جنرال موتور، کداک و زیراکس توجه ویژه‌ای به ساخت مجدد، تعمیرات و به‌طور کلی احیا محصولات برگشتی داشته‌اند [۳، صص ۶۶۳-۶۸۲]. در این راستا طراحی شبکه لجستیک به‌عنوان بخشی از برنامه‌ریزی زنجیره تأمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. از این رو طراحی مناسب این شبکه می‌تواند نقش مثبتی روی اهداف زنجیره تأمین به‌خصوص کاهش هزینه‌ها، سطح پاسخگویی و کارایی داشته باشد [۴، صص ۱۲۳-۱۴۰؛ ۵، صص ۱-۲۷]. در طی سال‌های اخیر تعداد اندکی از مقالات نیز به طراحی شبکه یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس پرداخته‌اند که این نوع یکپارچه‌سازی می‌تواند با جلوگیری از زیربیهنگی، باعث افزایش سطح کارایی و واکنش‌پذیری کل شبکه (شامل مستقیم و معکوس) شده و هماهنگی بین فرایندهای مستقیم و معکوس را تسهیل کند.

آنچه در این مقاله بررسی قرار شده است، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس که مراکز تأمین، مراکز تولید، مراکز توزیع، مراکز مشتریان، مراکز جمع‌آوری/احیا، مراکز بازیافت و مراکز انهدام را در بر می‌گیرد، می‌باشد.

در ادامه این مقاله به مرور ادبیات موضوع، تعریف مسئله و مدلسازی ریاضی، نتایج محاسباتی پرداخته می‌شود. در پایان نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می‌شود.

۲- مرور ادبیات

بیشتر ادبیات موجود در زمینه طراحی شبکه‌های لجستیک شامل مدل‌های مختلف مکانیابی

تسهیلات برپایه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط است. این مدل‌ها انواع مختلفی از مدل‌های ساده نظیر مکانیابی تسهیلات با ظرفیت نامحدود تا مدل‌های پیچیده‌تر نظیر مدل‌های چند رده‌ای با ظرفیت محدود و یا مدل‌های چند کالایی را شامل می‌شوند. در زمینه طراحی شبکه لجستیک معکوس ادبیات قابل توجهی وجود دارد که ما در این قسمت به برخی از مقالات مرتبط اشاره می‌کنیم.

استر و همکاران یک شبکه نیمه‌یکپارچه را که در آن شبکه لجستیک مستقیم موجود فرض شده و تنها مراکز جمع‌آوری و احیا در لجستیک معکوس مکانیابی می‌شوند، طراحی کرده است [۶، صص ۸۹۰-۹۰۷]. اما جریان مستقیم و معکوس به‌طور همزمان بهینه می‌شوند. آراس و همکاران [۷، صص ۱۲۲۳-۱۲۴۰] به ارائه یک مدل غیرخطی برای تعیین محل مراکز جمع‌آوری محصولات مصرف شده در یک شبکه لجستیک معکوس پرداخته‌اند. نکته قابل توجه در این مقاله توانایی مدل برای تعیین قیمت خرید محصولات مصرف شده از دارندگان آن با هدف حداکثر کردن سود به‌دست آمده است. لیستس و دکر [۸، صص ۲۶۸-۲۸۷] در یک شبکه بازیافت‌شن، به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته تصادفی با هدف حداکثرسازی سود پرداخته‌اند.

جایارامان و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه لجستیک معکوس با هدف حداقل‌سازی هزینه ارائه داده‌اند [۹، صص ۴۹۷-۵۰۸]. در این مقاله تنها به فعالیت‌های احیا محصولات برگشتی پرداخته شده است. کریک و همکاران [۱۰، صص ۳۸۱-۴۰۹] به طراحی شبکه لجستیک معکوس دو رده‌ای برای یک تولیدکننده دستگاه کپی با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط پرداختند. در این مدل هزینه‌های پردازش محصولات برگشتی و موجودی نیز در تابع هدف مورد توجه قرار گرفته است. اما مقالات اندکی نیز در سال‌های اخیر به طراحی شبکه توزیع به‌طور یکپارچه (شامل لجستیک مستقیم و معکوس به‌طور همزمان) پرداخته‌اند. از آن جمله می‌توان به کار [۱۱، صص ۳۴۶-۳۶۶] اشاره کرد.

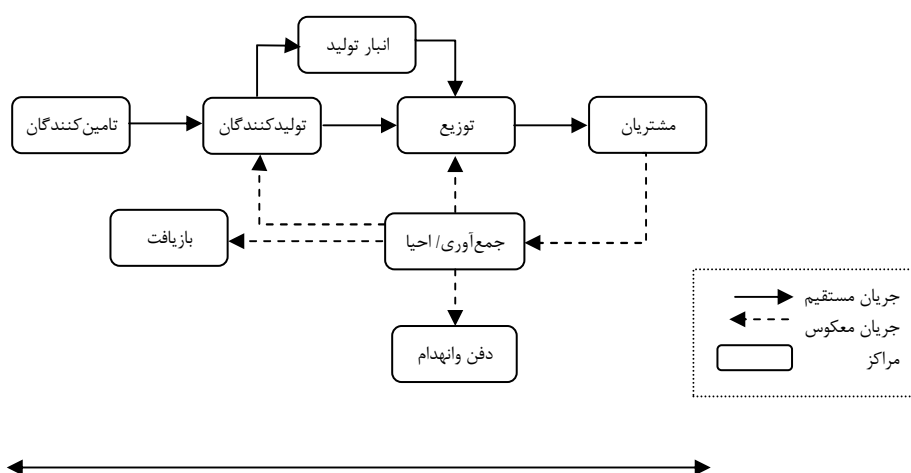
در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه لجستیک یکپارچه جهت فراهم‌آوردن خدمات لجستیک طرف سوم ارائه شده است که در آن از تسهیلات ترکیبی نیز استفاده شده است. کار مشابهی توسط [۱۲، صص ۱۷۶-۱۹۲] نیز ارائه شده است.

پیشوایی و همکاران نیز [۱۳، ۱۱۰۰-۱۱۱۲] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی یک شبکه ترکیبی ارائه دادند. در این مسئله به منظور جلوگیری از هزینه اضافی و صرفه‌جویی فرض شده است که احیای محصولات برگشتی در مراکز تولید انجام می‌شود. یکی دیگر از مقالاتی که به خوبی به طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس پرداخته است، مقاله [۱۴، صص ۴۵۵-۴۷۴] است. در این مقاله از یک نوع تسهیلات ترکیبی که هم نقش مراکز توزیع (انبار) در جریان مستقیم و هم نقش مراکز جمع‌آوری در جریان معکوس را به عهده دارد، برای طراحی شبکه لجستیک محصولات رایانه‌ای استفاده شده است. فلیشمن و همکاران [۱۵، صص ۱۵۶-۱۷۳] نیز نشان دادند که طراحی شبکه لجستیک به‌طور یکپارچه و همزمان در مقایسه با رویکرد سنتی می‌تواند موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌ها شود.

۳- تعریف مسئله

شبکه مورد بررسی در این مقاله یک شبکه لجستیک مستقیم و معکوس تک‌دوره‌ای چندمحصولی است که مسیر رفت شامل مراکز تأمین، مراکز تولید، مراکز توزیع و مراکز مشتریان می‌باشد و در مسیر برگشت شامل مراکز جمع‌آوری/احیا، مراکز بازیافت و مراکز دفن و انهدام می‌باشد. شبکه لجستیک یکپارچه دارای یک ساختار واگرا - همگرا است، به این معنا که در حالت مستقیم از کارخانه به سمت مشتریان با ساختاری واگرا روبه‌رو هستیم و در حالت معکوس از مشتریان به سمت جمع‌آوری/احیا و سایر مراکز (بازیافت، توزیع، دفن و انهدام) همگرا و نیمه‌همگرا مواجه می‌باشیم. موجودیت‌های شبکه در جریان مستقیم به ترتیب شامل مراکز تأمین‌کننده، مراکز تولیدکننده (کارخانه)، مراکز توزیع و مشتریان می‌باشد. مواد اولیه به مراکز تولید حمل می‌شوند و از مراکز تولید تعدادی از کالاها به مراکز توزیع حمل شده و تعدادی دیگر در انبار نگهداری می‌شوند. کالاها از مراکز توزیع به محل مشتریان حمل و تحویل داده می‌شوند. باید توجه داشته باشیم منظور از محل مشتریان می‌تواند خرده‌فروشان یا مراکز خوشه‌ای از مشتریان نهایی باشد. در جریان معکوس کالاهای مصرف شده از مناطق مشتریان به مرکز جمع‌آوری/احیا و از آنجا برحسب کیفیت و میزان عیب و نقص به مراکز توزیع به صورت محصولات دست دوم، به مراکز تولید جهت ساخت مجدد و استفاده مجدد، به

مراکز بازیافت جهت تهیه مواد خام و مراکز انهدام جهت دفن ایمن جابه‌جا می‌شوند. کالای تعمیر شده و ساخت مجدد شده در چرخه مستقیم به جریان در می‌آیند. به این ترتیب شبکه مورد بررسی یک شبکه لجستیک حلقه بسته خواهد بود (شکل ۱). این شبکه قابلیت حمایت از انواع صنایع مانند تولید تجهیزات الکترونیکی و دیجیتالی (مانند رایانه، دوربین و غیره) [۱۰، صص ۳۸۱-۴۰۹؛ ۱۴، صص ۴۵۵-۴۷۴] صنایع تولید وسایل نقلیه [۶، صص ۸۹۰-۹۰۷] و سایر صنایع مشابه را دارد.



شکل ۱ شبکه جریان شبکه لجستیک یکپارچه مورد بررسی

۴- فرض‌های مدل

- مدل به صورت تک هدفه، تک دوره‌ای و چند محصولی می‌باشد.
- ظرفیت تمامی تسهیلات محدود است
- تقاضای مشتریان و مقادیر کالای برگشتی قطعی می‌باشد.
- مکان‌های تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان مشخص و ثابت می‌باشد.
- فضای حل گسسته می‌باشد.
- به تمامی تقاضای مشتریان پاسخ داده می‌شود و تمام کالاهای برگشتی جمع‌آوری



می‌شوند.

- کیفیت محصولات تعمیر شده از کیفیت محصولات نو متفاوت می‌باشد و به صورت محصولات دست دوم عرضه می‌شود.
- از آن جایی که محل فروش محصولات دست دوم و محصولات نو یکسان می‌باشد، برای این مدل یک نوع مشتری در نظر می‌گیریم.
- هزینه نگهداری وابسته به موجودی پایان دوره می‌باشد و کمبود جایز نیست.
- مکان تولیدکنندگان و مشتریان ثابت بوده و مکان‌های دیگر شامل مکان توزیع، مکان تأمین‌کنندگان، مکان جمع‌آوری/احیا، مکان بازیافت و مکان دفن و انهدام بالقوه می‌باشد.
- هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول از مراکز تأمین‌کننده به مراکز تولیدکننده به صورت هزینه خرید مواد خام در نظر گرفته شده است.

۵- نمادهای مدل

۵-۱- مجموعه‌ها

- I اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز تأمین‌کنندگان $i \in I$
- J اندیس مجموعه نقاط ثابت برای مراکز تولیدکنندگان $j \in J$
- K اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز توزیع $k \in K$
- L اندیس مجموعه نقاط ثابت برای مراکز مشتریان $l \in L$
- M اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز جمع‌آوری و احیا $m \in M$
- P اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز بازیافت $p \in P$
- N اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز دفن و انهدام $n \in N$
- S اندیس مجموعه محصولات $s \in S$

۵-۲- پارامترها

- d_i^s میزان تقاضای محصول s از مرکز مشتری i
- r_i^s میزان برگشتی محصول s از مرکز مشتری i
- Bm^s نرخ برگشتی محصول s از مرکز مشتری i به مرکز جمع‌آوری / احیا m

- Bj^s نرخ برگشتی محصول s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز تولیدکننده j
- Bp^s نرخ برگشتی محصول s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز بازیافت p
- Bn^s نرخ برگشتی محصول s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز دفن و انهدام n
- Bk^s نرخ برگشتی محصول s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز توزیع k
- f_k هزینه ثابت احداث مرکز توزیع در محل k
- f_m هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری / احیا در محل m
- f_p هزینه ثابت احداث مرکز بازیافت در محل p
- f_n هزینه ثابت احداث مرکز دفن و انهدام در محل n
- c_{ij}^s کل هزینه‌های حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول s از مرکز تأمین کننده i به مرکز تولیدکننده j
- c_{jk}^s کلیه هزینه‌های حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول s از مرکز تولیدکننده j به مرکز توزیع k
- c_{jj}^s کل هزینه‌های حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول s از مرکز تولیدکننده i به انبار خودش
- c_{jk}^s کل هزینه‌های حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول s از انبار تولیدکننده j به مرکز توزیع k
- c_{kl}^s کل هزینه‌های حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول s از مرکز توزیع k به مرکز مشتری l
- c_{lm}^s کل هزینه‌های حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول برگشتی s از مرکز مشتری l به مرکز جمع‌آوری / احیا m
- c_{mp}^s کل هزینه‌های حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول برگشتی s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز بازیافت p
- c_{mn}^s کل هزینه‌های حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول برگشتی s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز دفن و انهدام n
- c_{mj}^s کل هزینه‌های حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول برگشتی s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز تولیدکننده j

C_{mk}^S کل هزینه‌های حمل و نقل و جابه‌جایی هر واحد محصول برگشتی S از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز توزیع k

Ca_i ظرفیت مرکز تأمین‌کنندگان در محل i

Ca_j ظرفیت مرکز تولیدکنندگان در محل j

Ca_{jj} ظرفیت انبار تولیدکنندگان در محل j

Cr_j ظرفیت برای ساخت مجدد محصولات در مرکز تولیدکننده j

Ca_k ظرفیت مرکز توزیع در محل k

Cr_k ظرفیت برای محصولات دست دوم در مرکز توزیع k

Ca_m ظرفیت مرکز جمع‌آوری / احیا در محل m

Ca_p ظرفیت مرکز بازیافت در محل p

Ca_n ظرفیت مرکز دفن و انهدام در محل n

h_j^S هزینه نگهداری هر واحد محصول S در انبار تولیدکننده

۳-۵- متغیرها

$$Y_m = \begin{cases} 1 & \text{متغیر ۰ یا ۱ اگر مرکز جمع‌آوری / احیا } m \text{ احداث شود ۱ در غیر این صورت ۰.} \\ 0 & \end{cases}$$

$$Y_k = \begin{cases} 1 & \text{متغیر ۰ یا ۱ اگر مرکز توزیع } k \text{ احداث شود ۱ در غیر این صورت ۰.} \\ 0 & \end{cases}$$

$$Y_p = \begin{cases} 1 & \text{متغیر ۰ یا ۱ اگر مرکز بازیافت } p \text{ احداث شود ۱ در غیر این صورت ۰.} \\ 0 & \end{cases}$$

$$Y_n = \begin{cases} 1 & \text{متغیر ۰ یا ۱ اگر مرکز دفن و انهدام } n \text{ احداث شود ۱ در غیر این صورت ۰.} \\ 0 & \end{cases}$$

X_{ij}^S مقدار جریان محصولات S از مرکز تأمین‌کننده i به مرکز تولیدکننده j

X_{jk}^S مقدار جریان محصولات S از مرکز تولید کننده j به مرکز توزیع k

Q_{jj}^S مقدار جریان محصولات S از مرکز تولید کننده j به انبار خودش

X_{kl}^S مقدار جریان محصولات S از مرکز توزیع k به مرکز مشتری l

Q_j^s : مقدار جریان محصولات s از انبار تولیدکننده j به مرکز توزیع k
 (۲) X_{mj}^s : مقدار جریان محصولات برگشتی s از مرکز مشتری l به مرکز جمع‌آوری / احیا m
 X_{mj}^s : مقدار جریان محصولات برگشتی s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز تولیدکننده j
 X_{mk}^s : مقدار جریان محصولات برگشتی s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز توزیع k
 X_{mp}^s : مقدار جریان محصولات برگشتی s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز بازیافت p
 X_{mn}^s : مقدار جریان محصولات برگشتی s از مرکز جمع‌آوری / احیا m به مرکز بازیافت n
 U_j^s : میزان موجودی باقیمانده محصول s در انبار مرکز تولیدکننده j

۶- مدل ریاضی پیشنهادی

نمادهای به کارگرفته شده در مدل ریاضی ارائه شده برای مسئله مورد بررسی در بخش‌های بالا تعریف شده‌اند که با استفاده از آن‌ها مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه لجستیک یکپارچه با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } TC = & \sum_{k \in K} f_k Y_k + \sum_{m \in M} f_m Y_m + \sum_{p \in P} f_p Y_p + \sum_{n \in N} f_n Y_n \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}^s X_{ij}^s + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} c_{jj}^s Q_{jj}^s + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk}^s X_{jk}^s \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk}^s Q_{jk}^s + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} c_{kl}^s X_{kl}^s + \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} c_{lm}^s X_{lm}^s \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} c_{mp}^s X_{mp}^s + \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} c_{mn}^s X_{mn}^s + \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} c_{mj}^s X_{mj}^s \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} c_{mk}^s X_{mk}^s \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} h_j^s U_j^s \end{aligned} \quad (۱)$$

s.t.

$$\sum_{k \in K} X_{kl}^s = d_l^s \forall l \in L, \forall s \in S \quad (۲)$$

$$\sum_{m \in M} X_{lm}^s = r_l^s \forall l \in L, \forall s \in S \quad (۳)$$

S



$$\sum_{k \in K} X_{mk}^s = Bk^s \sum_{l \in L} X_{lm}^s \quad \forall m \in M, \forall s \in S \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} X_{mj}^s = Bj^s \sum_{l \in L} X_{lm}^s \quad \forall m \in M, \forall s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} X_{mp}^s = Bp^s \sum_{l \in L} X_{lm}^s \quad \forall m \in M, \forall s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{n \in N} X_{mn}^s = Bn^s \sum_{l \in L} X_{lm}^s \quad \forall m \in M, \forall s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} (X_{jk}^s + Q_{jk}^s) = \sum_{l \in L} X_{kl}^s - \sum_{m \in M} X_{mk}^s \quad \forall k \in K, \forall s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij}^s + \sum_{m \in M} X_{mj}^s = \sum_{k \in K} X_{jk}^s + Q_{jj}^s \quad \forall j \in J, \forall s \in S \quad (9)$$

$$U_j^s = Q_{jj}^s - \sum_{k \in K} Q_{jk}^s \quad \forall j \in J, \forall s \in S \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} Q_{jk}^s \leq Q_{jj}^s \quad \forall j \in J, \forall s \in S \quad (11)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{j \in J} X_{ij}^s \leq Ca_i \quad \forall i \in I \quad (12)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} X_{jk}^s + \sum_{s \in S} Q_{jj}^s \leq Ca_j \quad \forall j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{l \in L} X_{kl}^s \leq Ca_k Y_k \quad \forall k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} X_{mk}^s Bk^s + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} X_{mj}^s Bj^s + \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} X_{mn}^s Bn^s + \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} X_{mp}^s Bp^s \leq Ca_m Y_m \quad \forall m \in M \quad (15)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{m \in M} X_{mk}^s \leq Cr_k Y_k \quad \forall k \in K \quad (16)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{m \in M} X_{mj}^s \leq Cr_j Y_j \quad \forall j \in J \quad (17)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{m \in M} X_{mn}^s \leq Ca_n Y_n \quad \forall n \in N \quad (18)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{m \in M} X_{mp}^s \leq Ca_p Y_p \quad \forall p \in P \quad (19)$$

$$\sum_{s \in S} U_j^s \leq Ca_{jj} Y_j \quad \forall j \in J \quad (20)$$

$$\sum_{k \in K} Y_k \geq 1 \quad (21)$$

$$\sum_{m \in M} Y_m \geq 1 \quad (22)$$

$$\sum_{p \in P} Y_p \geq 1 \quad (23)$$

$$\sum_{n \in N} Y_n \geq 1 \quad (24)$$

$$Bk^s + Bj^s + Bp^s + Bn^s = 1 \quad \forall s \in S \quad (25)$$

$$Y_m, Y_k, Y_p, Y_n \in \{0, 1\} \quad \forall m \in M, \forall k \in K, \forall p \in P, \forall n \in N \quad (26)$$

$$X_{ij}^s, X_{jk}^s, Q_{jj}^s, U_j^s, X_{kl}^s, Q_{jk}^s, X_{lm}^s, X_{mj}^s, X_{mk}^s, X_{mp}^s, X_{mn}^s \geq 0 \quad (27)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall l \in L, \forall m \in M, \forall n \in N, \forall p \in P$$

عبارت ۱ نشان‌دهنده تابع هدف است که شامل حداقل‌سازی هزینه احداث تسهیلات، هزینه جابه‌جایی و حمل‌ونقل محصولات در جریان مستقیم و معکوس و هزینه حاصل از نگهداری محصولات در انبار می‌باشد. عبارت‌های ۲ و ۳ تضمین می‌کند که در جریان مستقیم به تمامی تقاضای مشتریان پاسخ داده می‌شود و در جریان برگشت تمامی کالاهای برگشتی از مراکز مشتریان جمع‌آوری شود. عبارت‌های ۴ تا ۱۰ مربوط به محدودیت‌های تعادل جریان در گره‌ها می‌باشند. عبارت ۱۱ تضمین می‌کند میزان جریان خروجی از انبار تولیدکنندگان کمتر از مجموع جریان ورودی به انبار تولیدکنندگان می‌باشد. عبارت‌های ۱۲ تا ۲۰ تضمین می‌کند که جریان تنها بین نقاطی در جریان باشد که در آن‌ها تسهیلی احداث شده باشد و همچنین مجموع جریان در هر تسهیل از ظرفیت آن تجاوز نکند. عبارت‌های ۲۱ تا ۲۴ تضمین می‌کند حداقل یکی از مراکز بالقوه فعال باشد. عبارت ۲۵ تضمین می‌کند که مجموع ضرایب محصولات برگشتی برابر ۱ می‌باشد. محدودیت‌های ۲۶ و ۲۷ نوع متغیرهای تصمیم مسئله را تعیین می‌کنند.

۷- نتایج محاسباتی

برای سنجش کارایی مدل ارائه شده ۵ مجموعه داده برای تشکیل پنج مسئله آزمایشی تولید شده است که در جدول ۱ نمایش داده شده است. سعی شده مسائل از اندازه‌های کوچک شروع و به اندازه‌های بزرگ ختم شود. برای به‌دست آوردن نتایج محاسباتی، مدل در نرم‌افزار LINGO 8.0 برنامه‌نویسی شده و خروجی نرم‌افزار در نوع حل‌کننده Global Solver محاسبه شده است. تمام محاسبات به کمک رایانه با پردازشگر Pentium® 4, 3.06 GHz 512 MB of RAM سیستم عامل Windows XP انجام شده است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها و حل دقیق به‌دست آمده در جدول ۲ نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که در نمودار ۱ نشان داده می‌شود با افزایش اندازه مسئله زمان حل محاسباتی نیز افزایش پیدا

می‌کند که البته زمان محاسباتی با افزایش تعداد محصول نسبت به مجموعه دیگر پارامترها از ضریب افزایش کمتری برخوردار است.

جدول ۱ ابعاد مسائل آزمایشی تولید شده

شماره مسئله	تامین I	تولید J	توزیع K	مشتریان L	جمع‌آوری/احیا M	بازیافت P	انهدام N	محصول S
۱	۲	۱	۲	۳	۲	۲	۱	۱
۲	۷	۴	۶	۵	۴	۳	۴	۱
۳	۱۰	۶	۸	۱۵	۸	۶	۷	۱
۴	۵	۲	۴	۳	۲	۲	۳	۲
۵	۷	۴	۶	۵	۴	۳	۴	۲

جدول ۲ خلاصه نتایج محاسباتی

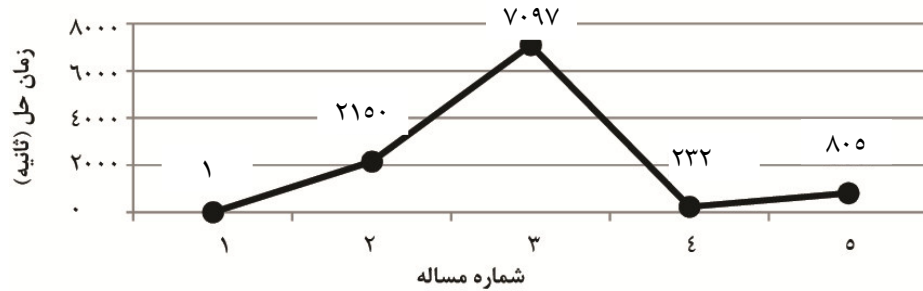
شماره مسئله	تعداد متغیرهای گسسته	تعداد متغیرهای صفر و یک	تعداد محدودیت	تابع هدف	زمان حل (ثانیه)
۱	۵۹	۷	۱۱۱	۱۱۷۱۵۳۴	۱
۲	۲۳۷	۱۷	۴۲۶	۱۱۴۲۴۷۶	۲۱۵۰
۳	۶۸۶	۲۹	۱۲۱۵	۱۲۱۳۰۵۰	۷۰۹۷
۴	۱۶۵	۱۱	۳۱۷	۱۶۰۰۶۹۷	۲۳۲
۵	۴۴۱	۱۷	۸۰۵	۱۱۴۳۲۷۴	۸۰۵

۸- تحلیل حساسیت

رفتار مدل با پارامترهای متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای تقاضا و میزان محصولات برگشتی به‌عنوان پارامترهای اصلی برای بررسی رفتار مدل در نظر گرفته شده‌اند [۱۶، صص ۴۲۳-۴۳۱]. دیگر پارامترهای مدل به‌طور ثابت فرض شده است و مقادیر اسمی آن‌ها در جدول ۳ آورده شده‌اند. مقادیر تقاضا از ۱۰ واحد تا ۱۲۰ واحد به ازای هر مشتری متغیر می‌باشد؛ یعنی به ازای ۲ مرکز مشتری، مقادیر تقاضا از ۲۰ واحد تا ۲۴۰ واحد متغیر



خواهد بود.



نمودار ۱ زمان حل مدل با نرم‌افزار LINGO 8.0 (ثانیه)

جدول ۳ مقادیر اسمی پارامترهای مدل

۰/۲	نرخ برگشتی محصولات از مراکز m به مراکز j
۰/۲	نرخ برگشتی محصولات از مراکز m به مراکز p
۰/۲	نرخ برگشتی محصولات از مراکز m به مراکز n
۰/۴	نرخ برگشتی محصولات از مراکز m به مراکز k
۴۰۰۰۰۰	هزینه ثابت احداث مراکز k
۵۰۰۰۰۰	هزینه ثابت احداث مراکز m
۲۵۰۰۰۰	هزینه ثابت احداث مراکز p
۱۲۰۰۰۰	هزینه ثابت احداث مرکز دفن و انهدام در محل n
۶	هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصولات از مراکز i به مراکز j
۵	هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصولات از مراکز z به مراکز k
۲	هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصولات از مراکز i به انبار خودش
۲	هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصولات از انبار z به مراکز k
۳	هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصولات از مراکز k به مراکز l
۴	هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول برگشتی از مراکز l به مراکز m
۳	هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول برگشتی از مراکز m به مراکز p
۶	هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول برگشتی از مراکز m به مراکز n
۵	هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول برگشتی از مراکز m به مراکز j
۴	هزینه حمل‌ونقل و جابه‌جایی هر واحد محصول برگشتی از مراکز m به مراکز k

ادامه جدول ۳

۲۵۰	ظرفیت مراکز i
۱۷۰	ظرفیت مراکز j
۱۰۰	ظرفیت انبار j
۴۰	ظرفیت برای ساخت مجدد محصولات در مراکز j
۱۸۰	ظرفیت مراکز k
۸۰	ظرفیت مراکز m
۴۵	ظرفیت مراکز p
۶۵	ظرفیت مراکز n
۵	هزینه نگهداری هر واحد محصولات در انبار تولیدکننده

جدول ۴ تابع هدف به ازای مقادیر مختلف تقاضا

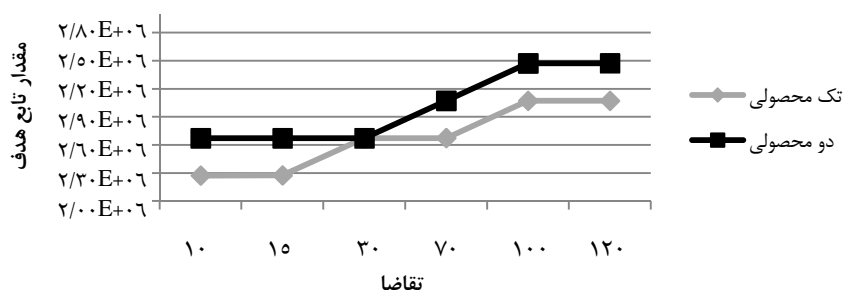
تقاضا	تک محصول		دو محصول	
	تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل
۱۰	۱۲۷۲۳۸۰	۴	۱۶۷۰۵۱۱	۱۰۴
۱۵	۱۲۷۳۵۰۵	۵	۱۶۷۰۶۰۱	۱۷۴
۳۰	۱۶۷۰۴۳۶	۴۴	۱۶۷۰۸۷۱	۱۳۵
۷۰	۱۶۷۲۹۲۰	۷۴	۲۰۷۱۵۹۱	۱۳۲
۱۰۰	۲۰۷۱۰۶۶	۱۱۸	۲۴۷۲۱۳۱	۶۴
۱۲۰	۲۰۷۱۲۴۶	۶۶	۲۴۷۲۴۹۱	۱

محصولات برگشتی = ۶

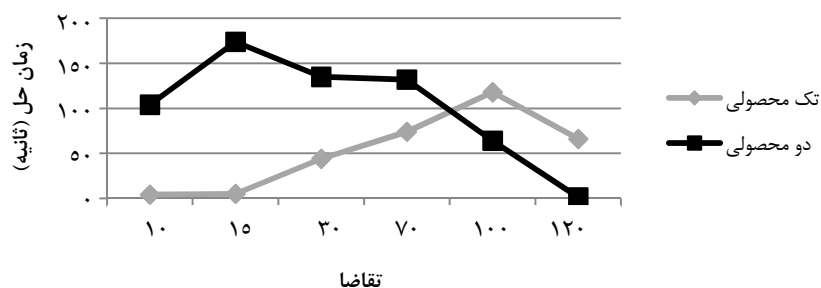
۹- اثر تقاضا

اثر مقادیر مختلف تقاضا بر تابع هدف با در نظر گرفتن مقدار ثابت ۶ برای مقادیر محصولات برگشتی بررسی شده است. همان طور که در جدول ۴ و نمودار ۲ قابل مشاهده می‌شود، در حالت کلی افزایش در مقادیر تقاضا باعث افزایش مقادیر تابع هدف می‌شود. تابع هدف به‌طور خطی متناسب با مقادیر تقاضا می‌باشد. رفتار خطی مشابه تابع هدف تا وقتی که مقادیر تقاضا از حداکثر ظرفیت شبکه تجاوز نکند و باز کردن مراکز بالقوه امکان‌پذیر نباشد، ادامه پیدا خواهد

کرد. در نمودار ۳ می‌بینیم که در حالت تک محصول با افزایش مقادیر تقاضا، زمان حل روند رو به رشد داشته و در حالت چند محصول به ازای افزایش تقاضا، زمان حل روند رو به کاهش دارد، به طوری که با ازای ثابت محصولات برگشتی برابر ۶ و تقاضای برابر ۱۲۰ زمان حل محاسبات تقریباً صفر می‌شود.



نمودار ۲ تابع هدف با ازای مقادیر مختلف تقاضا



نمودار ۳ زمان حل محاسبات به ازای تقاضای مختلف

۱۰- اثر محصولات برگشتی

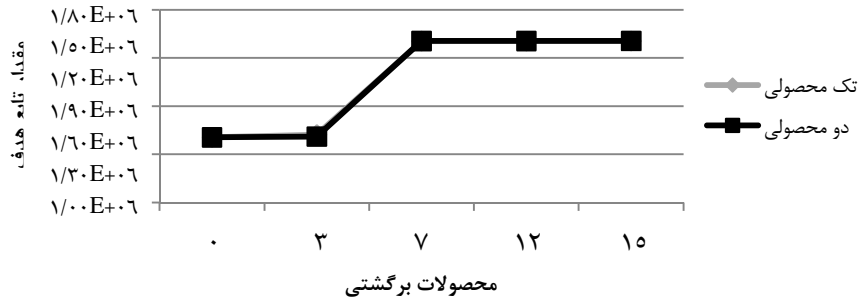
اثر مقادیر محصولات برگشتی بر تابع هدف با در نظر گرفتن مقادیر ثابت تقاضا برابر ۱۵ و ۱۰۰ بررسی شده است. همان طور که در جدول‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است، افزایش محصولات برگشتی به‌طور خطی باعث افزایش مقدار تابع هدف می‌شود. در جدول ۵ مشاهده می‌شود که به ازای مقدار ثابت تقاضا برابر ۱۵ در هر دو حالت تک محصول و دو محصول، به ازای افزایش محصولات برگشتی از ۰ به ۱۵، مقدار تابع هدف ۲۴ درصد افزایش داشته است و نمودار ۴ که نشان می‌دهد علاوه بر درصد رشد یکسان تابع هدف، نمودار در حالت تک محصول و دو محصول بر یکدیگر منطبق می‌باشند؛ یعنی مقادیر تابع هدف با ازای افزایش محصول تغییر نکرده است. در نمودار ۵ می‌بینیم که با ازای تقاضا برابر ۱۵ و در هر دو حالت تک محصول و چند محصول زمان حل محاسبات روند رو به رشدی داشته است.

همان طور که در جدول ۶ و نمودار ۶ قابل مشاهده است، به ازای مقدار ثابت تقاضا برابر ۱۰۰ در حالت تک محصول، به ازای افزایش محصولات برگشتی از ۰ به ۱۰۰، مقدار تابع هدف ۹۲ درصد افزایش داشته است و در حالت دو محصول به ازای افزایش محصولات برگشتی از ۰ به ۵۰ تابع هدف ۳۰ درصد افزایش داده و به ازای مقادیر بیشتر محصولات برگشتی به علت بیشتر بودن مقادیر محصولات برگشتی از حداکثر ظرفیت شبکه، محاسبه‌ها امکان‌پذیر نبوده است. همان طور که از نمودار ۵ قابل مشاهده است، به ازای تقاضای ثابت برابر ۱۰۰ و در هر دو حالت تک محصول و چند محصول، به ازای افزایش محصولات برگشتی زمان حل محاسبات روند رو به کاهش داشته است.

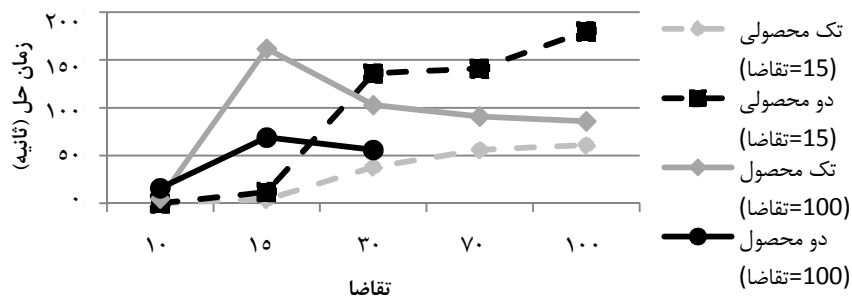
جدول ۵ تابع هدف با ازای مقادیر مختلف محصولات برگشتی

محصولات برگشتی	تک محصول تابع هدف	زمان حل	دو محصول تابع هدف	زمان حل
۰	۱۲۷۰۱۳۵	۰	۱۲۷۰۲۷۰	۰
۳	۱۲۷۱۸۲۰	۴	۱۲۷۳۶۴۰	۱۲
۷	۱۶۷۰۳۲۸	۳۸	۱۶۷۰۶۵۶	۱۳۶
۱۲	۱۶۷۰۴۶۶	۵۶	۱۶۷۰۹۳۲	۱۴۱
۱۵	۱۶۷۰۵۴۹	۶۱	۱۶۷۱۰۹۸	۱۸۰

تقاضا= ۱۵



نمودار ۴ تابع هدف به ازای مقادیر مختلف محصولات برگشتی با (تقاضا = ۱۵)

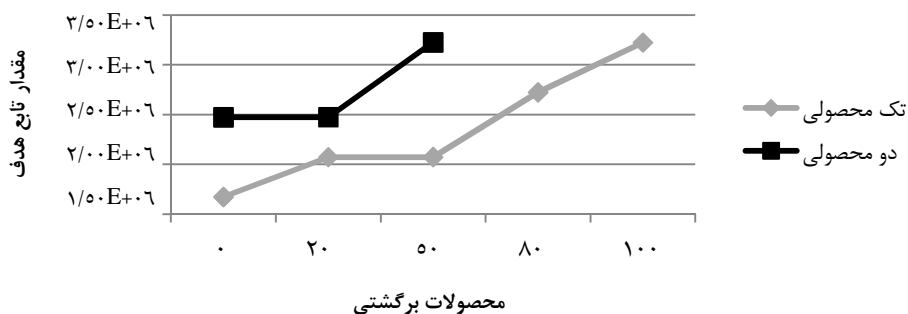


نمودار ۵ زمان حل محاسبه ها به ازای تقاضای مختلف

جدول ۶ تابع هدف با ازای مقادیر مختلف محصولات برگشتی

دو محصول		تک محصول		محصولات برگشتی
زمان حل	تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	
۱۶	۲۴۷۱۸۰۰	۵	۱۶۷۰۹۰۰	۰
۶۹	۲۴۷۲۹۰۴	۱۶۲	۲۰۷۱۴۵۲	۲۰
۵۴	۳۲۲۴۵۶۰	۱۰۳	۲۰۷۲۲۸۰	۵۰
-	جواب موجه وجود ندارد	۹۱	۳۷۲۳۱۰۸	۸۰
-	جواب موجه وجود ندارد	۸۶	۳۲۲۳۴۰۸	۱۰۰

تقاضا = ۱۰۰



نمودار ۶ تابع هدف با ازای مقادیر مختلف محصولات برگشتی (تقاضا = ۱۰۰)

۱۱- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای جلوگیری از ایجاد زیربهنیگی، زمان طراحی جدا از هم شبکه لجستیک مستقیم و معکوس مدلی برای طراحی یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس چند سطحی، چند محصولی، تک دوره‌ای، توسعه داده شده است. در مدل توسعه داده شده، سعی شده است تا ضعف‌های مقاله‌های پیشین مرتفع شوند، به همین خاطر تقریباً تمام مراکز لجستیک رو به جلو شامل مراکز تأمین‌کنندگان، مراکز تولید، مراکز توزیع، مراکز مشتریان و برای لجستیک معکوس شامل مراکز جمع‌آوری/احیا، مراکز بازیافت و مراکز دفن و انهدام در نظر گرفته شده‌اند. مدل طراحی شده نشان می‌دهد که تابع هدف به‌طور مستقیم تحت تأثیر مقادیر تقاضا و مقادیر محصولات برگشتی می‌باشد. از موضوعاتی که در تحقیقات آینده می‌تواند مورد توجه قرار گیرد می‌توان به توسعه مدل برای شبکه‌های چند دوره‌ای و در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضای محصولات برگشتی اشاره کرد.



۱۲- منابع

- [1] Bagheri-neghad Z., Kazemzadeh R., Asadi R., "Identifying and ranking of success factors in automotive reverse logistics through interpretive structural modeling (ISM)"; *journal of Management Research in Iran*, Vol. 17, No. 1, 2013 .
- [2] Meade L., Sarkis J., Presley A., "The theory and practice of reverse logistics"; *International Journal of Logistics Systems and Management*, Vol. 3, 2007.
- [3] Keskin B.B., Uster H.; "Meta-heuristic approaches with memory and evolution for a multi-product production/distribution system design problem"; *European Journal of Research*, Vol. 182, 2007.
- [4] Chopra S., "Designing the distribution network in a supply chain"; *Transportation Research - Part E*, Vol. 39, 2003.
- [5] Shen Z. M.; "Integrated supply chain design models: A survey and future research directions"; *Journal of Industrial and Management Optimization*, Vol. 3, No. 1, 2007.
- [6] Üster H., Easwaran G., Akcali E., Cetinkaya S., "Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model"; *Nav. Research Logistics*, Vol. 54, 2007.
- [7] Aras N., Aksen D., Tanugur AG., "Locating collection centers for incentive-dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles"; *European Journal of Operational Research*, Vol. 191, No. 3, 2008.
- [8] Listes O., Dekker R., "A stochastic approach to a case study for product recovery network design"; *European Journal of Operational Research*, Vol. 160, 2005.
- [9] Jayaramann V., Guige Jr VDR, Srivastava R., "A closed-loop logistics model for remanufacturing"; *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 50, 1999.
- [10] Krikke HR, Van Harten A, Schuur PC., "Reverse logistic network re-design for copiers"; *OR Spectrum*, Vol. 21, 1999.
- [11] Ko H. J., Evans G. W., "A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic

- integrated forward/reverse logistics network for 3PLs”; *Computer & Operations Research*, Vol. 24, 2007.
- [12] Min H., Ko HJ., “The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers”; *International Journal of Production Economics*, Vol. 113, 2008.
- [13] Pishvae M.R., Zanjirani Farahani R., Dollaert W., “A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design”; *Computer and Operation Research*, Vol. 37, 2010.
- [14] Lee D., Dong M., “A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery”; *Transportation Research-Part E*, Vol. 44, 2008.
- [15] Fleischmann M., Beullens P., Bloemhof-Ruwaard JM, Wassenhove L., “The impact of product recovery on logistics network design”; *Production and Operations Management*, Vol. 10, 2001.
- [16] El-Sayed M., Afia N., El-Kharbotly A., “A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 58, No. 3, 2010.