

طراحی شبکه لجستیکی رو به جلو/ بازگشتی چند محصولی با استفاده از برنامه ریزی غیر خطی

حسام الدین نجمی^{۱*}، احمد ماکوئی^۲، سید محمد سید حسینی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران، گروه مهندسی صنایع

۲- دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران، گروه مهندسی صنایع

۳- استاد دانشگاه علم و صنعت ایران، گروه مهندسی صنایع

رسید مقاله: ۲۵ بهمن ۱۳۹۱

پذیرش مقاله: ۵ تیر ۱۳۹۲

چکیده

طراحی یکپارچه شبکه‌های لجستیکی در دهه گذشته توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. در این شبکه‌ها فاکتورهای مختلفی به صورت ادغامی در نظر گرفته می‌شوند که با برنامه‌ریزی ریاضی به صورت یکپارچه مساله را مدل می‌نمایند. این مقاله نیز در همین راستا به طراحی یک مدل غیر خطی می‌پردازد که در نتیجه آن مکان‌های مناسب تأسیس مراکز مورد نظر که شامل مراکز تولید/باز یافت، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری/بازرسی و مراکز انهدام مشخص می‌شوند و هم‌چنین جریان بهینه بین آن‌ها به دست می‌آید. در ادامه نیز این مساله چند محصولی با روش‌های دقیق حل شده و نتایج حاصل از آن ارایه گردیده است.

کلمات کلیدی: لجستیک مستقیم و معکوس یکپارچه، مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود، بهینه سازی جریان مواد، طراحی شبکه توزیع

۱ مقدمه

یکی از تصمیمات مهم سطح راهبردی مدیریت زنجیره تأمین (اعم از لجستیک مستقیم و معکوس) طراحی شبکه لجستیک مستقیم و معکوس می‌باشد. به طور کلی تصمیمات شبکه شامل تعیین مکان تسهیلات، نقش و ظرفیت آن‌ها و تخصیص آن‌ها و بازارهای مختلف می‌باشد. تمامی این موضوعات تأثیر به‌سزایی در انعطاف پذیری، کارایی و در نتیجه عملکرد زنجیره تأمین دارند.

تصمیمات استراتژیک طراحی شبکه لجستیک در جریان مستقیم و معکوس مرتبط با تعیین نوع شبکه است که شامل مکان‌یابی و تعیین ظرفیت تسهیلات تولید، ذخیره، هم‌زمانی بارانداز، توزیع، جمع‌آوری، مرتب‌سازی،

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس پست الکترونیکی: hesam.najmi@gmail.com ; najmi@ind.iust.ac.ir

احیا، بازیافت و انهدام می باشد. از آنجا که احداث تسهیلات یا بستن آن ها هزینه و زمان زیادی را مصرف می کنند؛ تغییر آن ها در کوتاه مدت امکان پذیر نمی باشد.

در دو دهه اخیر سازمان های زیادی مانند کوداک و زیراکس بر فعالیت های تولید مجدد و بازیافت تمرکز کرده اند و به موفقیت های چشمگیری دست یافته اند [۱]. عوامل محرک شرکت ها برای رو آوردن به برنامه ریزی، اجرا و کنترل لجستیک معکوس را می توان در سه دسته اصلی الزامات قانونی، حساسیت های محیط زیستی، و سودآوری اقتصادی احصا کرد. از دیدگاه محیط زیستی و در قوانینی که به تازگی در کشورها به ویژه اتحادیه اروپا به تصویب رسیده است، شرکت ها مسئول جمع آوری محصولات اسقاطی و برگشتی خود شناخته می شوند و از دیدگاه اقتصادی می توانند از سود حاصل از احیا و بازیافت محصولات به طور مستقیم استفاده نمایند [۲]. اگر چه طراحی شبکه لجستیک معکوس تأثیرات بسزایی در عملکرد شبکه لجستیک مستقیم دارد؛ طراحی شبکه های لجستیک مستقیم و معکوس به صورت جدا از هم موجب بروز زیربهینگی می شود. با توجه به زیربهینگی در هزینه ها، سطح خدمت و پاسخگویی طراحی شبکه لجستیکی مستقیم و معکوس باید به صورت یکپارچه صورت گیرد [۳-۵]. این نوع یکپارچگی می تواند به عنوان یکپارچگی افقی در نظر گرفته شود؛ به این خاطر که شامل یکپارچه سازی مسایل بهینه سازی مرتبط در یکی از سطوح مدیریتی می باشد (سطح راهبردی، سطح تاکتیکی و سطح عملیاتی) برای مثال یکپارچه سازی انتخاب تأمین کننده با طراحی شبکه و یا یکپارچه سازی طراحی زنجیره تأمین مستقیم و معکوس از جمله یکپارچه سازی افقی در سطح استراتژیک است. یکپارچه سازی تصمیمات راهبردی مانند طراحی شبکه با تصمیمات سطح تاکتیکی مانند مدیریت موجودی و یا با سطح عملیاتی مانند مسیریابی، می تواند به عنوان یکپارچه سازی عمودی در نظر گرفته شود [۶]. مقاله حاضر به طراحی یک شبکه چند سطحی یکپارچه لجستیکی مستقیم و معکوس پرداخته که شامل مراکز تولید، توزیع، جمع آوری/بازرسی، بازیافت و انهدام می باشد. هم چنین در این مقاله مدل به صورت چند محصولی ارائه گردیده است. ادامه مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲ مرور ادبیات موضوع مورد بررسی قرار گرفته شود. برای طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم/معکوس، یک برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح در بخش سوم ارائه شده. قسمت چهارم به حل مدل با استفاده از نرم افزار لینگو پرداخته است و بخش پنجم به نتیجه گیری و پیشنهادات آتی اختصاص یافته.

۲ مرور ادبیات

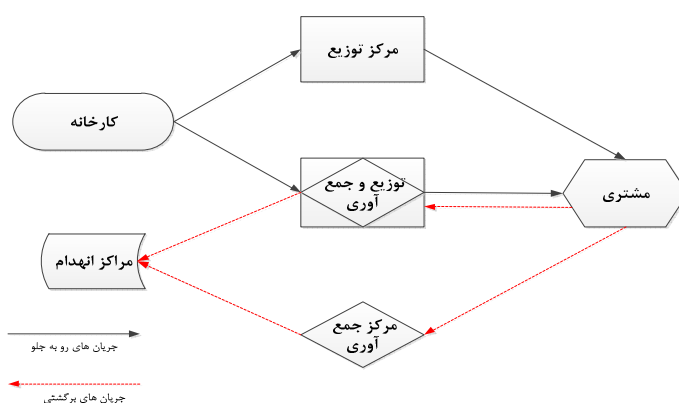
بیشتر ادبیات موجود در زمینه طراحی شبکه های لجستیک شامل مدل های مختلف مکان یابی تسهیلات بر پایه برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته است. این مدل ها انواع مختلفی را از مدل های ساده نظیر مکان یابی تسهیلات با ظرفیت نامحدود تا مدل های پیچیده تر نظیر مدل های چند رده ای با ظرفیت محدود شامل می شوند. جایارامان و همکاران (۱۹۹۹) یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه لجستیک معکوس با هدف حداقل سازی هزینه ارائه دادند. در این مقاله تنها به فعالیت های احیا محصولات برگشتی پرداخته شده است [۷]. یکی از عوامل مهم در طراحی شبکه لجستیک معکوس عدم قطعیت در تقاضا و هم چنین نوع و کیفیت محصولات برگشتی است. لیستس و دکر (۲۰۰۵) با در نظر گرفتن این موضوع در یک شبکه بازیافت سنگ به

ارایه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح [۸] و آراس و همکاران (۲۰۰۷) به ارایه یک مدل غیر خطی برای تعیین محل مراکز جمع‌آوری محصولات مصرف شده در یک شبکه ساده لجستیک معکوس پرداخته‌اند. نکته قابل توجه در این مقاله توانایی مدل برای تعیین قیمت خرید محصولات مصرف شده از دارندگان آن می‌باشد [۹]. آستر و همکاران (۲۰۰۷) یک شبکه نیمه یکپارچه را که در آن شبکه لجستیک مستقیم، موجود فرض شده و تنها مراکز جمع‌آوری و احیا در لجستیک معکوس مکان‌یابی می‌شوند؛ طراحی کردند [۱].

برای طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته فراهم آورندگان خدمات لجستیک طرف سوم، دو و ایوانز (۲۰۰۸) یک مدل پیشرفته دو هدفه برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته با ادغام مراکز توزیع با مراکز جمع‌آوری و مراکز احیا ارایه نمودند؛ البته از حالت‌های مختلف احیا تنها جنبه تعمیرات را مورد توجه قرار دادند [۱۰]. فلیسچمن (۲۰۰۱) نشان داد که طراحی شبکه لجستیک به طور یکپارچه و همزمان در مقایسه با رویکرد سنتی می‌تواند موجب صرفه جویی قابل توجهی در هزینه‌ها گردد. سالما و همکاران (۲۰۰۷) سعی بر آن داشته تا با رفع ضعف‌های موجود در مقاله فلیسچمن (۲۰۰۱) مدلی عام‌تر به کمک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته ارایه می‌دهد [۳]. یکی دیگر از مقالاتی که به خوبی به طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس پرداخته، مقاله لی و دانگ (۲۰۰۸) است. در این مقاله از یک نوع تسهیل ترکیبی که هم نقش مراکز توزیع در جریان مستقیم و هم نقش مراکز جمع‌آوری در جریان معکوس را بر عهده دارد که برای طراحی شبکه لجستیک محصولات رایانه‌ای استفاده شده است [۴]. در بخش سوم، مدل پیشنهادی بیان شده و ویژگی‌های آن شرح داده می‌شود. در بخش چهارم، نتایج عددی برای تایید مدل پیشنهادی به همراه تجزیه و تحلیل آن تشریح خواهد شد. در انتهای این مقاله، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات بعدی در قالب بخش پنجم آورده خواهند شد.

۳ تشریح مساله و بیان مدل ریاضی

شبکه یکپارچه لجستیکی مستقیم/معکوس مورد بررسی یک شبکه چند کالایی و چند رده‌ای است که شامل مراکز تولید/باز یافت، مراکز توزیع، مراکز مشتریان، مراکز جمع‌آوری/بازرسی و مراکز انهدام می‌باشد. در این مساله برخی از مکان‌های بالقوه وجود دارند که می‌توانند به طور هم‌زمان هم مرکز توزیع و هم مرکز جمع‌آوری/بازرسی باشند. این شبکه با فرض لزوم ارضای کامل تقاضای مشتریان و هم‌چنین جمع‌آوری تمامی کالاهای برگشتی، ثابت بودن محل مشتریان و آگاهی از مقدار کالای برگشتی از هر مشتری، ثابت بودن تعداد مراکز انهدام، مراکز جمع‌آوری و مراکز تولید بالقوه و آگاهی از ظرفیت هر یک به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته مدل شده است. خروجی‌های مدل شامل تعداد و محل مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری/بازرسی، مراکز انهدام و هم‌چنین مراکز توزیعی که با مراکز جمع‌آوری/بازرسی ادغام شده‌اند می‌باشند. دیگر خروجی مدل مقدار جریان بهینه بین تمامی تسهیلات موجود در شبکه با هدف حداقل سازی هزینه‌ها می‌باشد.



شکل ۱. شبکه زنجیره تامین مستقیم/ معکوس

۱-۳ مجموعه‌ها

- I مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز تولید و بازیافت.
- J مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز توزیع.
- K مکان‌های ثابت مشتریان.
- L مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز جمع‌آوری و بازرسی.
- M مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز انهدام.
- E مجموعه نقاط بالقوه که می‌توانند به صورت ترکیبی مرکز جمع‌آوری/ بازرسی و مرکز توزیع مدل باشند.
- P مجموعه اقلام کالاها.

۲-۳ پارامترها

- d_{kp} : تقاضای مشتریان در منطقه k برای محصول p .
- r_{kp} : نرخ برگشت کالاها توسط مشتریان منطقه k برای محصول p .
- s_p : متوسط نرخ انهدام برای کالای p .
- f_i : هزینه ثابت تاسیس مرکز تولید/ بازیافت در مکان i .
- o_j : هزینه ثابت تاسیس مرکز توزیع در مکان j .
- h_l : هزینه ثابت تاسیس مرکز جمع‌آوری/ بازرسی در مکان i .
- a_m : هزینه ثابت تاسیس مرکز انهدام در مکان m .
- f_e : میزان هزینه صرفه جویی شده در اثر ادغام مراکز توزیع و مراکز جمع‌آوری/ بازرسی در مکان e .
- cx_{ijp} : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p از مرکز تولید/ بازیافت مکان i به مرکز توزیع j .
- cu_{jkp} : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p از مرکز توزیع در مکان j به مرکز مشتری k .
- cq_{klp} : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p به مرکز توزیع J از مرکز تولید/ بازیافت مکان i .

CP_{lip} : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p به مرکز تولید/بازیافت i از مرکز جمع آوری/بازرسی در مکان l .

CT_{imp} : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p به مرکز انهدام m از مرکز جمع آوری/بازرسی در مکان l .

CAW_{ip} : ظرفیت تولید برای مرکز تولید/بازیافت واقع در مکان i برای محصول p .

CAY_{jp} : ظرفیت مرکز توزیع واقع در مکان j برای محصول p .

CAZ_{lp} : ظرفیت مرکز جمع آوری/بازرسی در مکان i برای محصول p .

CAV_{mp} : ظرفیت مرکز انهدام در مکان m برای محصول p .

CAR_{ip} : ظرفیت بازیافت برای مرکز تولید/بازیافت واقع در مکان i برای محصول p .

۳-۳ متغیرهای تصمیم

۳-۳-۱ متغیرهای تصمیم پیوسته

x_{ijp} : مقدار محصول p حمل شده از مرکز تولید/بازیافت i به مرکز توزیع j .

u_{jkp} : مقدار محصول p حمل شده از مرکز توزیع j به مرکز مشتری k .

Q_{klp} : مقدار محصول p بازگشتی حمل شده از مشتریان واقع در مکان k به مرکز جمع آوری/بازرسی l .

P_{lip} : مقدار محصول p که قابل بازیافت هستند و از مرکز جمع آوری/بازرسی l به مرکز تولید/بازیافت i حمل می شوند.

T_{imp} : مقدار قراضه های محصول p که از مرکز جمع آوری/بازرسی l به مرکز انهدام m .

۳-۳-۲ متغیر تصمیم گسسته

۱: اگر مرکز توزیع در مکان j تاسیس شود.
۰: در غیر این صورت

۱: اگر مرکز تولید و بازیافت در مکان i باز باشد.
۰: در غیر این صورت

۱: اگر مرکز توزیع در مکان j تاسیس شود.
۰: در غیر این صورت

۱: اگر مرکز جمع آوری/بازرسی در مکان l تاسیس شود.
۰: در غیر این صورت

۱: اگر مرکز انهدام در مکان m تاسیس شود.
 } v_m
 °: در غیر این صورت

۳-۴ بیان مدل ریاضی

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & \sum_{i \in I} f_i w_i + \sum_{j \in J} o_j y_j + \sum_{l \in L} h_l z_l + \sum_{m \in M} a_m v_m - \sum_{e \in E} f_e z_e y_e + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{xijp} x_{ijp} \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ujkp} u_{jkp} + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} c_{qklp} Q_{klp} + \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} c_{timp} T_{imp} \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} c_{p lip} P_{lip} \end{aligned} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J} U_{jkp} = d_{kp} \quad \forall k \in K \quad \forall p \in P \quad (2)$$

$$\sum_{l \in L} Q_{klp} = r_{kp} d_{kp} \quad \forall k \in K \quad \forall p \in P \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijp} = \sum_{k \in K} u_{jkp} \quad \forall j \in J \quad \forall p \in P \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} T_{imp} = s_p \sum_{k \in K} Q_{klp} \quad \forall l \in L \quad \forall p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} P_{li} = (1 - s_p) \sum_{k \in K} Q_{kl} \quad \forall l \in L \quad \forall p \in P \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijp} \leq w_i c a w_{ip} \quad \forall i \in I, \forall p \in P \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijp} \leq y_j c a y_{jp} \quad \forall j \in J, \forall p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} u_{jkp} \leq y_j c a y_{jp} \quad \forall j \in J, \forall p \in P \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} Q_{klp} \leq z_l c a z_{lp} \quad \forall l \in L, \forall p \in P \quad (10)$$

$$\sum_{l \in L} T_{imp} \leq v_m c a v_{mp} \quad \forall m \in M, \forall p \in P \quad (11)$$

$$\sum_{l \in L} P_{lip} \leq w_i c a r_{ip} \quad \forall i \in I, \forall p \in P \quad (12)$$

$$\sum_{m \in M} T_{lmp} + \sum_{i \in I} P_{lip} \leq Z_l c a z_{lp} \quad \forall l \in L, \forall p \in P \quad (13)$$

$$\sum_{l \in L} P_{li} \leq \beta \sum_{j \in J} x_{ijp} \quad \forall i \in I, \forall p \in P \quad (14)$$

$$\begin{aligned} w_i, y_j, z_l, v_m &\in \{0, 1\} \\ \forall i &\in I \\ \forall j &\in J \\ \forall l &\in L \\ \forall m &\in M \end{aligned} \quad (15)$$

$$x_{ijp}, U_{jpk}, Q_{klp}, T_{lmp}, P_{lip} \geq 0 \quad (16)$$

تابع هدف این مدل کلیه هزینه‌ها شامل هزینه‌های ثابت تسهیلات و هزینه‌های حمل و نقل را کمینه کرده؛ هزینه صرفه‌جویی شده حاصل از ادغام مراکز توزیع و جمع‌آوری/بازرسی را مورد توجه قرار می‌دهد.

محدودیت‌های دوم و سوم تضمین می‌کنند که تقاضای همه مشتریان ارضا شده و تمام تقاضای برگشتی مشتریان جمع‌آوری می‌شود. محدودیت‌های چهارم تا ششم بالانس جریان بین مراکز تولید/بازيافت، توزیع، جمع‌آوری/بازرسی، انهدام و مراکز مشتریان را تضمین می‌کند. محدودیت‌های ۷ تا ۱۴ نشان دهنده ظرفیت محدود تسهیلات می‌باشند که از حمل محصولات تولید شده به مراکز استقرار نیافته جلوگیری می‌کنند و در نهایت محدودیت ۱۴ تا ۱۶ نشان دهنده متغیرهای غیر منفی و متغیرهای صفر و یک مساله می‌باشند.

جمله $\sum_{e \in E} f_e z_e y_e$ در تابع هدف غیر خطی می‌باشد؛ زیرا به صورت ضرب دو متغیر بیان گردیده است.

برای خطی کردن این جمله از یک متغیر جدید تحت عنوان Q_e استفاده نماییم و تابع هدف را به صورت زیر بازسازی می‌کنیم:

$$Q_e = Z_e Y_e \quad \forall e \in E$$

$$Q_e \in \{0, 1\} \quad \forall e \in E$$

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & \sum_{i \in I} f_i w_i + \sum_{j \in J} o_j y_j + \sum_{l \in L} h_l z_l + \sum_{m \in M} a_m v_m - \sum_{e \in E} f_e Q_e + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c x_{ijp} x_{ijp} \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c u_{jpk} u_{jpk} + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} c q_{klp} Q_{klp} + \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} c t_{lmp} T_{lmp} \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} c p_{lip} P_{lip} \end{aligned}$$

به دلیل این که تابع هدف به صورت کمینه سازی می باشد؛ مقدار Q_e تمایل به یک شدن دارد؛ بنابراین محدودیتی به صورت زیر تعریف می شود که رابطه منطقی بین $Z_e Y_e$ و Q_e برقرار می کند اگر و تنها اگر Z_e و Y_e هر دو مقدار یک را دارا باشند؛ Q_e مقدار ۱ را دارا می شود.

$$2Q_e \leq Z_e + Y_e \quad \forall e \in E$$

۴ رویکرد حل

در این قسمت با ارایه یک مثال عددی و حل آن با نرم افزار لینگو مدل را به صورت بهینه برای مساله پیشنهادی ارایه می نماییم. جدول (۱) بیانگر ابعاد مساله و جدول (۲) نمایانگر چگونگی تولید پارامترهای مدل می باشد [۱۱]. با استفاده از نرم افزار MATLAB پارامترهای فوق تولید گشته؛ سپس مدل با نرم افزار بهینه سازی ریاضی (Lingo8.0) حل گردید. جواب بهینه حاصل از مساله نمونه توسط نرم افزار برای تابع هدف معادل ۲/۳۶۰/۷۳۸ دلار اعلام گردید. همین طور تنها مرکز تولید و احیای دوم برقرار خواهد گشت و از آن مقادیر مختلف واحد کالای نوع اول و دوم به مراکز توزیع دوم و سوم ارسال می گردد.

جدول ۱. ابعاد مساله نمونه

۲	تعداد مراکز تولید و احیا
۳	تعداد مراکز توزیع
۵	تعداد نقاط مشتری
۳	تعداد مراکز جمع آوری و بازرسی
۱	تعداد مراکز انهدام

جدول ۲. مقدار پارامترهای مدل

ردیف	پارامتر	محدوده
۱	d_{kp}	یکنواخت (۱۰-۲۵۰)
۲	r_{kp}	یکنواخت (۰/۷۵-۰/۹)
۳	s_p	یکنواخت (۰/۱۵-۰/۲۵)
۴	f_i	یکنواخت (۴۵۰۰۰۰-۸۰۰۰۰۰)
۵	a_m	یکنواخت (۲۵۰۰۰۰-۵۰۰۰۰۰)
۶	h_l	یکنواخت (۲۵۰۰۰۰-۵۰۰۰۰۰)
۷	o_j	یکنواخت (۲۰۰۰۰۰-۴۵۰۰۰۰)
۸	f_e	یکنواخت (۹۵۰۰۰-۱۵۰۰۰۰)
۹	cp_{lip}, ct_{lmp} $cx_{ijp}, cu_{jpk}, cq_{klp}$	یکنواخت (۴-۱۲)
۱۰	caw_{ip}	یکنواخت (۶۰۰-۱۵۰۰)
۱۱	cay_{jp}	یکنواخت (۴۰۰-۱۰۰۰)

ردیف	پارامتر	محدوده
۱۲	caz_{lp}	یکنواخت (۷۰۰-۲۵۰)
۱۳	cav_{mp}	یکنواخت (۴۰۰-۱۵۰)
۱۴	car_{ip}	یکنواخت (۱۵۰۰-۶۰۰)

۵ نتیجه گیری و پیشنهادات آتی

به علت اهمیت هزینه‌های شبکه در مدیریت زنجیره تأمین و فعالیت‌های لجستیکی معکوس، این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای طراحی یک شبکه لجستیکی یکپارچه مستقیم و معکوس ارائه می‌کند. مدل ارائه شده در این مقاله به صورت چند محصولی می‌باشد. هم‌چنین برای کاهش پیچیدگی مدل غیر خطی ارائه شده با اضافه کردن یک متغیر و یک محدودیت جدید به آن، مدل تبدیل به یک مدل برنامه‌ریزی خطی تبدیل گردیده و با استفاده از نرم افزار Lingo حل شده است. با توجه به مطالب ذکر شده، برخی از مواردی که در تحقیقات آتی می‌توانند مورد توجه قرار گیرند به شرح ذیل است:

- لحاظ عدم قطعیت در تقاضای محصولات برگشتی.
- یکپارچه سازی طراحی در جهت عمودی.
- ارائه روش‌های کارا برای مسایل در ابعاد واقعی.

منابع

- [1] Uster, H., Easwaran, G., ElifAkcali, E., Silaetinkaya, S., (2007). Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. Naval Research Logistic.
- [2] Meade, L., Sarkis, J., Presley, A., (2007). The theory and practice of reverse logistics. International Journal of Logistics systems and Management.
- [3] Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-ruwaard, J. M., Wassenhove, L., (2001). The impact of product recovery on logistics network design. Production and Operations Management.
- [4] Lee, D., Dong, M., (2008). A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. Transportation Research Part E.
- [5] Verstreppe, S., Cruijssen, F., de Brito, M., Dullaert, W., (2007). An exploratory analysis of reverse logistics in Flanders. European Journal of Transport and Infrastructure Research.
- [6] Shen, Z. M., (2007). Integrated supply chain design models: a survey and future research directions. Journal of Industrial and Management Optimization.
- [7] Jayaraman, V., Guige, Jr., Srivastava, R., (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. Journal of the Operational Research Society.
- [8] Listes, O., Dekker, R., (2005). A stochastic approach to a case study for product recovery network design. European Journal of Operational Research.
- [9] Aras, N., Aksent, D., Tanugur, A. G., (2007). Locating collection centers for incentive- dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles. European Journal of Operational Research.
- [10] Ko, H. J., Evans, G. W., (2007). A genetic-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. Computers & Operations Research.