

مدل کمینه‌سازی هزینه برای کاهش کربن ناشی از روش‌های مختلف حمل و نقل

امیر مهاجری^{*}، محمد فلاح^۲

۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

رسید مقاله: ۶ اسفند ۱۳۹۳

پذیرش مقاله: ۱۰ مرداد ۱۳۹۴

چکیده

اخیراً به علت رشد نگرانی‌های زیست محیطی توجه شایانی به مقوله بهبود محصولات مورد استفاده می‌شود. در این مقاله، مساله کربن محور در زنجیره تامین حلقه بسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. در زنجیره تامین حلقه بسته، محصولات برگشتی از دست مشتریان جمع می‌شوند و می‌توانند دفع و یا برای فروش مجدد بازتولید شوند. در این مطالعه، مدل حلقه بسته جامعی برای برنامه‌ریزی لجستیک با در نظر گرفتن همزمان اهداف سودمندی و زیست محیطی فرمول‌بندی می‌شود. در این راه، اهداف زیست محیطی با کاهش میزان کلی گاز دی اکسید کربن منتشره از حمل و نقل به دست می‌آید. به علاوه، معیار سودمندی می‌تواند در شبکه حلقه‌ای با کمینه کردن هزینه‌ها و حداکثرسازی سطوح خدمت‌رسانی ایجاد گردد. در انتها، یک مثال عددی به منظور سنجیدن صحت و اثربخشی مدل انجام می‌پذیرد.

کلمات کلیدی: زنجیره تامین حلقه بسته، برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته، میزان انتشار کربن، انتخاب نوع روش حمل و نقل.

۱ معرفی

مقوله مدیریت زنجیره تامین در دهه‌های اخیر از توجهات زیادی در جامعه علمی برخوردار شده است. امروزه، به دلیل وجود بازارهای رقابتی و جهانی، این امر برای شرکت‌ها ضروری است که به منظور ارتقای توانمندی‌ها و حیاتشان در بازار با یکدیگر تعامل و همکاری کنند. بدین وسیله، به اهدافی از قبیل کمینه کردن تمامی هزینه‌ها و تحویل‌ها در طول زنجیره تامین نایل می‌آیند [۱-۳]. زنجیره تامین، شبکه‌ایست مشتمل بر تامین کنندگان، تولید کنندگان، توزیع کنندگان، خرده‌فروشان و مشتریان که در آن مواد خام از تامین کنندگان دریافت، تبدیل، تولید و در نهایت به مشتریان نهایی تحویل داده می‌شوند [۴]. جریان‌های متعددی در زنجیره وجود دارند همانند

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: mohajeri.amir@gmail.com

جریان مواد، جریان اطلاعات و جریان‌های مالی. هماهنگی و یکپارچه‌سازی این جریان‌ها در طول زنجیره یک شرکت مقوله مدیریت زنجیره تامین (SCM) را معرفی می‌کنند [۵].

رشد اقتصادی در حد فاصل قرن بیستم تا قرن بیست و یکم منجر به افزایش در مصرف کالاها شده است. بنابراین، جریان‌های عظیم کالاها در سرتاسر جهان شکل گرفته است. در این راه، تولید و تمامی جوانب امور لجستیکی از قبیل حمل و نقل و انبارداری، مسایل زیست محیطی فراوانی از قبیل گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی را به وجود آورده‌اند [۶].

یکپارچه‌سازی مفهوم مدیریت زنجیره تامین سبز با مقوله حمایت از محیط زیست، کاهش سریع آلودگی را به همراه دارد. تحقیق و بررسی بر روی این موضوع در سال‌های اخیر به شدت افزایش داشته و منجر به افق تحقیقاتی جدیدی تحت عنوان مدیریت زنجیره تامین سبز (GSCM) گردیده است. بنابراین، این مدیریت پارادایمی جدید است که توسط آن زنجیره تامین ارتباط مستقیمی با محیط زیست پیدا می‌کند.

در سیستم‌های زنجیره تامین حلقه بسته / لجستیک معکوس، محصول پس از استفاده به تولیدکننده بازمی‌گردد و می‌تواند تعمیر و برای تحویل مجدد به مشتری بازتولید شود. مقوله زیست محیطی داغ برای یک شرکت، چگونگی کاهش استفاده از مواد به وسیله استفاده و بازتولید مجدد محصولات مصرف شده است. با این رویکرد مدیریت زنجیره تامین سبز وارد فاز جدیدی به نام مدیریت زنجیره تامین حلقه بسته می‌شود.

با مدیریت خوب لجستیک معکوس، حفاظت از محیط زیست با کمینه کردن تمامی هزینه‌ها در سرتاسر زنجیره تامین مقدور می‌باشد.

اکثر مقالات بر لجستیک معکوس تمرکز کرده‌اند و فقط مدل‌های مربوط به این حوزه را فرمول‌بندی کرده‌اند. بعضی محققان پا را فراتر نهاده و مدل‌های حلقه بسته را در نظر گرفته‌اند اما باز این‌ها نیز ارتباط فی مابین جریان‌ها رفت و برگشتی لحاظ نکرده‌اند [۷-۹]. این مدل‌ها اغلب ظرفیت‌های نامحدودی را برای لجستیک معکوس فرض می‌کردند که برای اظهار شمایی از واقعیت فرض نادرستی است. مقالات کمی وجود دارند که مدل حلقه بسته پیشنهادی آنها منطبق بر مفروضات واقعی است. در این مطالعات، محققان ظرفیت مشابهی را برای لجستیک معکوس فرض می‌کنند و رابطه جریان‌ها رفت و برگشت را نیز در نظر می‌گیرند [۱۰]. در این مقاله، یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته‌ای را طراحی می‌کنیم که نه تنها ارتباط فی مابین جریان‌ها رفت و برگشت را در نظر می‌گیرد که در آن ظرفیت برای لجستیک معکوس نیز محدود فرض می‌شود.

با مرور بر ادبیات زنجیره تامین که در بالا ارایه شد می‌توان فهمید که مقالات کمی ارتباط میان لجستیک‌های مستقیم و برگشت را در نظر می‌گیرند. در مطالعه حاضر، مدل ارایه شده توسط وانگ و سو در سال ۲۰۱۰ به منظور حمایت بیشتر از محیط زیست توسعه داده می‌شود [۱۰]. اول از همه، علاوه بر مدیریت صحیح و مناسب لجستیک معکوس به منظور کاهش اثرات منفی انتشارات گازهای گلخانه‌ای، استراتژی دیگری نیز برای دستیابی به این هدف والا به طور همزمان در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، ما بر روی جنبه مهم و تاثیرگذار زنجیره تامین سبز تمرکز می‌کنیم: ما بر روی انتخاب نوع روش حمل و نقل به عنوان راهی جهت کاهش میزان انتشار گاز تمرکز می‌کنیم.

ادغام یا یکپارچه سازی انتخاب نوع روش حمل و نقل با یک مدل حلقه بسته با هدف حمایت بیشتر از محیط زیست، نوآوری مهم این مطالعه است. برای این منظور، علاوه بر کمینه کردن هزینه های کلی در سرتاسر زنجیره تامین حلقه بسته، قانونی برای کاهش میزان انتشار ناشی از حمل محوله ها در نظر گرفته می شود. این مکانیزم هزینه ای برای میزان انتشار گاز در نظر می گیرد. در این مقاله، یک سناریو پیش برده می شود و برای این سناریو و مرتبط با قانون ذکر شده مساله ای فرمول بندی می شود. این سناریو عبارت است از:

- مدل به همراه میزان انتشار (مساله می نیم سازی هزینه انتشار)

ما در این مطالعه، از داده های تجربی به منظور تخمینی درست برای میزان انتشار گاز ناشی از انواع مختلف روش های حمل و نقل استفاده می کنیم. میزان انتشار کربن برای سناریو لحاظ می گردد جایی که موازنه ای بین زمان تحویل، هزینه حمل و نقل و میزان انتشار برای انتخاب نوع روش حمل و نقل برقرار است. برای مثال، حمل و نقل هوایی زمان تحویل کوتاه تر، هزینه حمل و نقل و میزان انتشار کربن بیش تری نسبت به حمل و نقل دریایی دارد.

در ادامه، مساله پیشنهادی با جزییات بیش تر مورد بررسی قرار می گیرد. پس از آن، در قسمت سوم فرمول بندی ریاضی برای سناریو و در قسمت چهارم مثال عددی به منظور صحت و اثربخشی روش ارایه می گردند. در پایان نتیجه گیری مطرح می گردد.

۲ توصیف مساله

ضرورتاً پنج مرحله در طول شبکه لجستیک سبز وجود دارند: تامین کنندگان، تولید کنندگان، توزیع کنندگان، مشتریان و جداسازها. در مطالعه حاضر، تعدادی تولید کننده، توزیع کننده، جداساز و مشتری که همگی توسط یک تامین کننده حمایت می شوند، انواع مختلف روش حمل و نقل و یک کالا با تقاضاهای معین و قطعی در نظر گرفته می شوند. اولین مساله، تصمیم گیری درباره انتخاب مکان های مناسب برای تولید کننده، توزیع کننده و جداسازها از میان مناطق جانشین است به نحوی که با رعایت محدودیت های موجودی و راضی نگه داشتن مشتریان به لحاظ تقاضا هزینه های عملیاتی و میزان انتشار کربن حداقل و سود حداکثر گردند. توزیع محصول از مراکز توزیع به مشتریان نقش حیاتی در این خصوص بازی می کند. رویکرد MDMTSP می تواند برای این منظور مفید باشد. هر فروشنده مستقر در توزیع کننده می بایست حرکت کند و مشتریان را ملاقات کند و سپس به توزیع کننده برگردد. در این مساله، فرض می کنیم که هر مشتری تنها توسط یک توزیع کننده تامین می شود. در ضمن، تمامی تقاضاها تامین می شوند. در این مطالعه، شروط اساسی زنجیره تامین حلقه بسته به عنوان فرضیات مساله در نظر گرفته می شوند که عبارتند از:

- تقاضاهای مشتریان می بایست تامین شوند.
- از جریان انتقالی بین دو مرحله نامتوالی می بایست جلوگیری شود.
- تعداد تسهیلات فعال و ظرفیت های مربوطه می بایست محدود باشند.

مقوله نرخ بازیافت فقط در ادبیات موضوع لجستیک حلقه بسته مطرح می‌شود و شامل نرخ‌های بهبود و دفع می‌باشد. در مدل پیشنهادی ما، مقدار بهبود به عنوان درصدی از تقاضای مشتریان همان‌طور که فرضیه لان و همکارانش در سال ۱۹۹۹ بر پایه وابستگی مقادیر محصولات برگشتی با تقاضای محصولات است، فرض می‌شود [۱۱]. بنابراین، فرض زیر نیز در مدل پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود.

- نرخ‌های بهبود و دفع در مدل در نظر گرفته می‌شوند.

یکی از خصوصیات مهم و اساسی مدل پیشنهادی، یکپارچه‌سازی انتخاب روش حمل و نقل و لجستیک حلقه بسته در زنجیره تامین است. در این مطالعه، زنجیره تامین حلقه بسته‌ای با هدف کمینه کردن تمامی هزینه‌ها و کاهش اثرات زیست محیطی در سرتاسر زنجیره با انتخاب مکان‌های بهینه تسهیلات، جریان‌های عملیاتی بهینه و روش‌های حمل و نقل بهینه در طول هر مرحله محدود به ظرفیت با ملاحظات تقاضای مشتریان و نرخ بازیافت طراحی می‌شود.

۳ مدل سازی ریاضی

در این قسمت، چگونگی یکپارچه‌سازی میزان انتشار کربن با مدل پیشنهادی و متدولوژی محاسبه آن ارایه می‌شود. در زیر، مساله کمینه‌سازی هزینه انتشار معرفی می‌شود که در آن هزینه‌ای برای میزان انتشار در نظر گرفته می‌شود.

مدل کمینه‌سازی هزینه انتشار

هدف مدل پایه پیشنهادی، کمینه‌سازی تمامی هزینه‌های عملیاتی و ساختاری در زنجیره است با این حال که محدودیت‌های جریان محصول، ساختار، ظرفیت، تقاضاهای مشتریان و پنجره زمانی را در نظر می‌گیرد. اما میزان انتشار که یک عامل مهم برای زنجیره تامین سبز است را در طول زنجیره نادیده می‌گیرد. در این قسمت، این مدل پایه‌ای را با اضافه کردن هزینه‌ای برای میزان انتشار کربن بسط می‌دهیم. در شمای تجارت انتشار، هزینه کربن به صورت $\text{€}/(\text{metric}) \text{ tonne emissions}$ نشان داده می‌شود که بیانگر قیمت کربن در هر تن انتشار کربن به یورو است. پس، یک هزینه انتشار کربن $CE (CE > 0)$ در هر تن گاز دی اکسید کربن منتشره در مدل لحاظ می‌گردد.

برای هر نوع روش حمل و نقل، $EM_total_MD_{ij}$ و $e_u_MD_{ij}$ به ترتیب میزان انتشار کربن و آن میزان اختصاص داده شده به هر واحد محصول از i امین کارخانه به j امین توزیع کننده را نشان می‌دهند. در صورتی که $EM_total_DC_{jk}$ و $e_u_DC_{jk}$ به ترتیب میزان انتشار کربن و آن میزان اختصاص داده شده به هر واحد محصول از j امین توزیع کننده به k امین مشتری را نشان می‌دهند. $EM_total_CC_{kl}$ و $e_u_CC_{kl}$ به ترتیب میزان انتشار کربن و آن میزان اختصاص داده شده به هر واحد محصول از k امین مشتری به l امین مشتری را نشان می‌دهند. $EM_total_CD_{kj}$ و $e_u_CD_{kj}$ به ترتیب میزان انتشار کربن و آن میزان اختصاص داده شده به هر واحد محصول از k امین مشتری به j امین توزیع کننده را نشان می‌دهند.

محصول از j امین توزیع کننده به m امین جداساز را نشان می دهند. $EM_total_DM_{mi}$ و $e_u_DM_{mi}$ به ترتیب میزان انتشار کربن و آن میزان اختصاص داده شده به هر واحد کارخانه را نشان می دهند.

به منظور فرمول بندی این مدل کمینه سازی هزینه انتشار به صورت ریاضی، تعریف پارامترها و متغیرهای زیر ضروری است:

شاخص ها

I	مجموعه مکان های کاندیدای تولید کننده
J	مجموعه مکان های کاندیدای توزیع کننده
K	مجموعه مشتریان
M	مجموعه مکان های کاندیدای جداساز
V	مجموعه انواع روش های حمل و نقل
$V_I \subset V$	مجموعه انواع روش های حمل و نقل در تولید کننده
$V_J \subset V$	مجموعه انواع روش های حمل و نقل در توزیع کننده
$V_M \subset V$	مجموعه انواع روش های حمل و نقل در جداساز

پارامترها

Cm_i	ظرفیت تولید کننده i
Tc_j	ظرفیت کل توزیع کننده j (مستقیم و معکوس)
Cd_m	ظرفیت جداساز m
Pc_j	درصد ظرفیت کل برای لجستیک معکوس در توزیع کننده j
pr_k	درصد بهبود مشتری k
Pl_m	درصد دفع جداساز m
dc_k	تقاضای مشتری k
$P_ \cos t_i$	هزینه واحد تولید در تولید کننده i
CMD_{v_i}	هزینه واحد حمل و نقل از تولید کننده به توزیع کننده با وسیله نقلیه v_i در هر کیلومتر
CDC_{v_j}	هزینه واحد حمل و نقل از توزیع کننده به مشتری با وسیله نقلیه v_j در هر کیلومتر
CDM_{v_m}	هزینه واحد حمل و نقل از جداساز به تولید کننده با وسیله نقلیه v_m در هر کیلومتر
FM_i	هزینه ثابت عملیات تولید کننده i
FDC_j	هزینه ثابت عملیات در توزیع کننده j
FD_m	هزینه ثابت عملیات در جداساز m

مهاجری و فلاح، مدل کینماتیک خرید برای کاهش کربن ناشی از روش های مختلف حمل و نقل

هزینه ثابت دفع در هر واحد	Cl
مسافت بین تولید کننده i و توزیع کننده j	dis_MD_{ij}
مسافت بین توزیع کننده j و مشتری k	dis_DC_{jk}
مسافت بین مشتری k و مشتری l	dis_CC_{kl}
مسافت بین توزیع کننده j و جداساز m	dis_DD_{jm}
مسافت بین جداساز m و تولید کننده i	dis_DM_{mi}
زمان حمل و نقل از توزیع کننده j به مشتری k با استفاده از وسیله نقلیه v_j	$t_DC_{jkv_j}$
زمان حمل و نقل از مشتری k به مشتری l با استفاده از وسیله نقلیه v_j	$t_CC_{klv_j}$
حد پایین زمان مورد انتظار تحویل محصول به مشتری k	a_c_k
حد بالای زمان مورد انتظار تحویل محصول به مشتری k	b_c_k
هزینه بهبود در توزیع کننده j از مشتری k	RC_{kj}
تعداد وسیله نقلیه v_i در تولید کننده i	NVM_{iv_i}
تعداد وسیله نقلیه v_j در توزیع کننده j	NVD_{jv_j}
تعداد وسیله نقلیه v_m در جداساز m	$NVDi_{mv_m}$
ظرفیت وسیله نقلیه v_i	CVM_{v_i}
ظرفیت وسیله نقلیه v_j	CVD_{v_j}
ظرفیت وسیله نقلیه v_m	$CVDi_{v_m}$
ماکزیمم بار برای وسیله نقلیه v_i	$LO_{max} - M_{v_i}$
ماکزیمم بار برای وسیله نقلیه v_j	$LO_{max} - D_{v_j}$
ماکزیمم بار برای وسیله نقلیه v_m	$LO_{max} - Di_{v_m}$
ضریب بار متوسط برای وسیله نقلیه v_i	$LF - M_{v_i}$
ضریب بار متوسط برای وسیله نقلیه v_j	$LF - D_{v_j}$
ضریب بار متوسط برای وسیله نقلیه v_m	$LF - Di_{v_m}$
حجم محصول	vol
چگالی محصول برای وسیله نقلیه v_i	ρ_{v_i}
وزن محصول	wp
ظرفیت کل کشتی باری	$capw$
ماکزیمم تعداد گره که یک فروشنده می تواند ملاقات کند	Q
می نیمم تعداد گره که یک فروشنده می تواند ملاقات کند	L
عدد بزرگ مثبت	M
ضریب ثابت انتشار	CEF

ضریب متغیر انتشار	VEF
مصرف سوخت برای وسیله نقلیه v_j	$FC - D_{v_j}$
مصرف سوخت دیزل برای وسیله نقلیه v_j	$FE - D_{v_j}$
مصرف سوخت کامیون مستقر در کارخانه	$FC - M$
مصرف سوخت دیزل کامیون مستقر در کارخانه	$FE - M$
مصرف سوخت کامیون مستقر در جداساز	$FC - Di$
مصرف سوخت دیزل کامیون مستقر در جداساز	$FE - Di$
ضریب مصرف سوخت برای قطار دیزلی	T
میزان انتشار سوخت برای قطار دیزلی	FER
وزن ناخالص قطار	$W - gr$
میزان انتشار سوخت برای کشتی	FEW
مصرف سوخت برای کشتی	FCW
قیمت کربن منتشره (نشان داده شده با $\text{€}/(\text{metric})\text{tonne emissions}$)	CE

متغیرهای تصمیم

اگر یک محصول توسط وسیله نقلیه v_i از تولید کننده i به توزیع کننده j حمل شود عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می گیرد.	$x - MD_{ijv_i}$
اگر یک محصول توسط وسیله نقلیه v_j از توزیع کننده j به مشتری k حمل شود عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می گیرد.	$x - DC_{jkv_j}$
اگر یک محصول توسط وسیله نقلیه v_j از توزیع کننده j به جداساز m حمل شود عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می گیرد.	$x - DD_{jmv_j}$
اگر یک وسیله نقلیه v_j از مشتری k به توزیع کننده j برگردد عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می گیرد.	$x - CD_{kjav_j}$
اگر یک محصول باز استفاده توسط وسیله نقلیه v_m از جداساز m به تولید کننده i حمل شود عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می گیرد.	$x - DM_{miv_m}$
اگر تولید در تولید کننده i اتفاق بیفتد عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می گیرد.	α_i
اگر توزیع کننده j فعال باشد عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می گیرد.	β_j
اگر جداساز m فعال باشد عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می گیرد.	γ_m
اگر یک محصول توسط وسیله نقلیه v_j از مشتری k به مشتری l حمل شود عدد یک و	$z - CC_{klv_j}$

در غیر این صورت عدد صفر تعلق می گیرد.	
میزان محصول حمل شده توسط وسیله نقلیه v_i از تولید کننده i به توزیع کننده j	$y - MD_{ijv_i}$
میزان محصول حمل شده توسط وسیله نقلیه v_j از توزیع کننده j به مشتری k	$y - DC_{jkv_j}$
میزان محصول بهبود داده شده حمل شده توسط وسیله نقلیه v_j از توزیع کننده j به جداساز m	$y - DD_{jmv_j}$
میزان محصول بهبود داده شده حمل شده توسط وسیله نقلیه v_j از مشتری k به توزیع کننده j	$y - CD_{kjav_j}$
میزان محصول باز استفاده شده توسط وسیله نقلیه v_m از جداساز m به تولید کننده i	$y - DM_{miv_m}$
میزان محصول حمل شده توسط وسیله نقلیه v_j از مشتری k به مشتری l	$y - CC_{klv_j}$
میزان تولید در تولید کننده i	PM_i
تعداد گره های ملاقات شده توسط فروشنده ها از توزیع کننده به گره مشتری k	u_k
مقدار محصول جمع آوری شده در مشتری k	$congR_k$
مقدار محصول بهبود جمع آوری شده در مشتری k	$congF_k$
زمان ورود محصول در مشتری k	S_k
میزان انتشار کلی وسیله نقلیه از کارخانه i به توزیع کننده j	$EM_total_MD_{ij}$
میزان انتشار کلی وسیله نقلیه از توزیع کننده j به مشتری k	$EM_total_DC_{jk}$
میزان انتشار کلی وسیله نقلیه از مشتری k به توزیع کننده j	$EM_total_CD_{kj}$
میزان انتشار کلی وسیله نقلیه از مشتری k به مشتری l	$EM_total_CC_{kl}$
میزان انتشار کلی وسیله نقلیه از توزیع کننده j به جداساز m	$EM_total_DD_{jm}$
میزان انتشار کلی وسیله نقلیه از جداساز m به کارخانه i	$EM_total_DM_{mi}$
میزان انتشار واحد وسیله نقلیه از کارخانه i به توزیع کننده j	$e_u_MD_{ij}$
میزان انتشار واحد وسیله نقلیه از توزیع کننده j به مشتری k	$e_u_DC_{jk}$
میزان انتشار واحد وسیله نقلیه از مشتری k به توزیع کننده j	$e_u_CD_{kj}$
میزان انتشار واحد وسیله نقلیه از مشتری k به مشتری l	$e_u_CC_{kl}$
میزان انتشار واحد وسیله نقلیه از توزیع کننده j به جداساز m	$e_u_DD_{jm}$
میزان انتشار واحد وسیله نقلیه از جداساز m به کارخانه i	$e_u_DM_{mi}$

با ارایه تعاریف بالا، مدل زیر برای زنجیره حلقه بسته پیشنهادی معرفی می گردد:

تابع هدف:

$$\begin{aligned}
 f = & \sum_{i \in I} \alpha_i \cdot FM_i + \sum_{j \in J} \beta_j \cdot FDC_j + \sum_{m \in M} \gamma_m \cdot FD_m + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{v_i \in V_I} y_{-MD_{ijv_i}} \cdot dis_{-MD_{ij}} \cdot CMD_{v_i} \quad (۱) \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{v_j \in V_J} y_{-DC_{jkv_j}} \cdot dis_{-DC_{jk}} \cdot CDC_{v_j} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} \sum_{v_j \in V_J} y_{-CC_{klv_j}} \cdot dis_{-CC_{kl}} \cdot CDC_{v_j} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{v_j \in V_J} y_{-CD_{kjav_j}} \cdot dis_{-DC_{jk}} \cdot CDC_{v_j} + \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{v_j \in V_J} y_{-DD_{jmv_j}} \cdot dis_{-DD_{jm}} \cdot CDC_{v_j} \\
 & + \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} \sum_{v_m \in V_M} y_{-DM_{miv_m}} \cdot dis_{-DM_{mi}} \cdot CDM_{v_m} + \sum_{i \in I} PM_i \cdot P_{-cost_i} + \\
 & \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{v_j \in V_J} y_{-CD_{kjav_j}} \cdot Rc_{kj} + CL \cdot \sum_{m \in M} \left[Pl_m \cdot \sum_{j \in J} \sum_{v_j \in V_J} y_{-DD_{jmv_j}} \right] + \\
 & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} e_{-u_{-MD_{ij}}} \cdot CE + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} e_{-u_{-DC_{jk}}} \cdot CE + \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} e_{-u_{-CC_{kl}}} \cdot CE \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} e_{-u_{-CD_{kj}}} \cdot CE + \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} e_{-u_{-DD_{jm}}} \cdot CE + \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} e_{-u_{-DM_{mi}}} \cdot CE
 \end{aligned}$$

محدودیت‌ها:

$$\sum_{i \in I} \alpha_i \geq 1, \quad (۲)$$

$$\sum_{j \in J} \beta_j \geq 1, \quad (۳)$$

$$PM_i \geq 1 - M(1 - \alpha_i), \quad \forall i \in I, \quad (۴)$$

$$\sum_{v_i \in V_I} \sum_{j \in J} x_{-MD_{ijv_i}} \geq 1 - M(1 - \alpha_i), \quad \forall i \in I, \quad (۵)$$

$$\sum_{v_i \in V_I} \sum_{i \in I} x_{-MD_{ijv_i}} \geq 1 - M(1 - \beta_j), \quad \forall j \in J, \quad (۶)$$

$$y_{-MD_{ijv_i}} \geq 1 - M(1 - x_{-MD_{ijv_i}}) \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall v_i \in V_I, \quad (۷)$$

$$\sum_{v_i \in V_I} \sum_{j \in J} y_{-MD_{ijv_i}} \leq Cm_i, \quad \forall i \in I, \quad (۸)$$

$$\sum_{j \in J} x_{-MD_{ijv_i}} \leq NVM_{iv_i} \quad \forall i \in I, \forall v_i \in V_I, \quad (۹)$$

$$\sum_{v_i \in V_I} x_{-MD_{ijv_i}} \leq 1, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \quad (۱۰)$$

$$wp \cdot y_{-MD_{ijv_i}} \leq CVM_{v_i} \cdot LF_{-M_{v_i}}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall v_i \in V_I, \quad (۱۱)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{k \in K} x_{-DC_{jkv_j}} \geq 1 - M(1 - \beta_j), \quad \forall j \in J, \quad (۱۲)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{k \in K} x_{-CD_{kjav_j}} \geq 1 - M(1 - \beta_j), \quad \forall j \in J, \quad (۱۳)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} x_{-DC_{jkv_j}} + \sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} x_{-CD_{kjav_j}} \leq 1, \quad \forall k \in K, \quad (۱۴)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} x_{-DC_{jkv_j}} + \sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in K} z_{-CC_{lkv_j}} = 1, \quad \forall k \in K, \quad (۱۵)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} x_{-CD_{kjav_j}} + \sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in K} z_{-CC_{klv_j}} = 1, \quad \forall k \in K, \quad (۱۶)$$

$$\sum_{l \in K} z_{-CC_{klv_j}} + \sum_{j \in J} x_{-CD_{kjav_j}} = \sum_{e \in K} z_{-CC_{ekv_j}} + \sum_{j \in J} x_{-DC_{jkv_j}}, \quad \forall k \in K, \quad \forall v_j \in V_J, \quad (17)$$

$$u(k) - u(l) + (Q \cdot z_{-CC_{klv_j}}) + ((Q - \gamma) \cdot z_{-CC_{lkv_j}}) \leq Q - \gamma, \quad \forall k, l \in K, \quad \forall v_j \in V_J, \quad (18)$$

$$u(k) + \left((Q - \gamma) \cdot \sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} x_{-DC_{jkv_j}} \right) - \sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} x_{-CD_{kjav_j}} \leq Q - \gamma, \quad \forall k \in K, \quad (19)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} x_{-DC_{jkv_j}} + \left((\gamma - L) \cdot \sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} x_{-CD_{kjav_j}} \right) \geq \gamma, \quad \forall k \in K, \quad (20)$$

$$congR_k = \left(\sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in K} z_{-CC_{klv_j}} \cdot congR_l \right) + dc_k, \quad \forall k \in K, \quad (21)$$

$$y_{-DC_{jkv_j}} \geq \gamma - M \left(\gamma - x_{-DC_{jkv_j}} \right), \quad \forall k \in K, \quad \forall v_j \in V_J, \quad \forall j \in J, \quad (22)$$

$$y_{-DC_{jkv_j}} \geq congR_k, \quad \forall k \in K, \quad \forall v_j \in V_J, \quad \forall j \in J, \quad (23)$$

$$wp \cdot y_{-DC_{jkv_j}} \leq CVD_{v_j} \cdot LF_{-D_{v_j}}, \quad \forall k \in K, \quad \forall v_j \in V_J, \quad \forall j \in J, \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K} x_{-DC_{jkv_j}} \leq NVD_{jv_j}, \quad \forall v_j \in V_J, \quad \forall j \in J, \quad (25)$$

$$\sum_{v_i \in V_I} \sum_{i \in I} y_{-MD_{ijv_i}} = \sum_{v_j \in V_J} \sum_{k \in K} y_{-DC_{jkv_j}}, \quad \forall j \in J, \quad (26)$$

$$congF_k = \left(\sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in K} z_{-CC_{lkv_j}} \cdot congF_l \right) + \lceil pr_k \cdot dc_k \rceil, \quad \forall k \in K, \quad (27)$$

$$y_{-CD_{kjav_j}} \geq \gamma - M \left(\gamma - x_{-CD_{kjav_j}} \right), \quad \forall k \in K, \quad \forall v_j \in V_J, \quad \forall j \in J, \quad (28)$$

$$y_{-CD_{kjav_j}} \geq congF_k, \quad \forall k \in K, \quad \forall v_j \in V_J, \quad \forall j \in J, \quad (29)$$

$$y_{-CC_{klv_j}} \geq \left(\sum_{j \in J} y_{-DC_{jkv_j}} + \sum_{h \in K} y_{-CC_{hkv_j}} \right) - \lceil (\gamma - pr_k) \cdot dc_k \rceil - M \left(\gamma - z_{-CC_{klv_j}} \right), \quad (30)$$

$$\forall k, l \in K, \quad \forall v_j \in V_J$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} x_{-DD_{jmv_j}} \geq \gamma - M \left(\gamma - \gamma_m \right), \quad \forall m \in M, \quad (31)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} x_{-DD_{jmv_j}} \leq \gamma, \quad \forall j \in J, \quad \forall m \in M, \quad (32)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{m \in M} x_{-DD_{jmv_j}} \geq \gamma - M \left(\gamma - \beta_j \right), \quad \forall j \in J, \quad (33)$$

$$y_{-DD_{jmv_j}} \geq \gamma - M \left(\gamma - x_{-DD_{jmv_j}} \right), \quad \forall j \in J, \quad \forall m \in M, \quad \forall v_j \in V_J, \quad (34)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{k \in K} y_{-CD_{kjav_j}} = \sum_{v_j \in V_J} \sum_{m \in M} y_{-DD_{jmv_j}}, \quad \forall j \in J, \quad (35)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{k \in K} y_{-DC_{jkv_j}} + \sum_{v_j \in V_J} \sum_{m \in M} y_{-DD_{jmv_j}} \leq Tc_j \cdot \beta_j, \quad \forall j \in J, \quad (36)$$

$$\sum_{m \in M} x_{-DD_{jmv_j}} \leq NVD_{jv_j}, \quad \forall j \in J, \forall v_j \in V_J, \quad (37)$$

$$wp \cdot y_{-DD_{jmv_j}} \leq CVD_{v_j} \cdot LF_{-D_{v_j}}, \quad \forall j \in J, \forall m \in M, \forall v_j \in V_J, \quad (38)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{m \in M} y_{-DD_{jmv_j}} \leq \lfloor Pc_j \cdot Tc_j \cdot \beta_j \rfloor, \quad \forall j \in J, \quad (39)$$

$$\sum_{v_m \in V_M} \sum_{i \in I} x_{-DM_{miv_m}} \geq 1 - M(1 - \gamma_m), \quad \forall m \in M, \quad (40)$$

$$\sum_{v_m \in V_M} x_{-DM_{miv_m}} \leq 1 \quad \forall m \in M, \forall i \in I, \quad (41)$$

$$\sum_{v_m \in V_M} \sum_{m \in M} x_{-DM_{miv_m}} \geq 1 - M(1 - \alpha_i), \quad \forall i \in I, \quad (42)$$

$$y_{-DM_{miv_m}} \geq 1 - M(1 - x_{-DM_{miv_m}}), \quad \forall m \in M, \forall i \in I, \forall v_m \in V_M, \quad (43)$$

$$\sum_{v_m \in V_M} \sum_{m \in M} y_{-DM_{miv_m}} + PM_i = \sum_{v_i \in V_I} \sum_{j \in J} y_{-MD_{ijv_i}}, \quad \forall i \in I, \quad (44)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} y_{-DD_{jmv_j}} = \left[Pl_m \cdot \sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} y_{-DD_{jmv_j}} \right] + \sum_{v_m \in V_M} \sum_{i \in I} y_{-DM_{miv_m}}, \quad \forall m \in M \quad (45)$$

$$\sum_{v_m \in V_M} \sum_{i \in I} y_{-DM_{miv_m}} + \left[Pl_m \cdot \sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} y_{-DD_{jmv_j}} \right] \leq \gamma_m \cdot Cd_m, \quad \forall m \in M, \quad (46)$$

$$\sum_{i \in I} x_{-DM_{miv_m}} \leq NVDi_{mv_m}, \quad \forall m \in M, \forall v_m \in V_M, \quad (47)$$

$$wp \cdot y_{-DM_{miv_m}} \leq CVDi_{v_m} \cdot LF_{-Di_{v_m}}, \quad \forall m \in M, \forall i \in I, \forall v_m \in V_M, \quad (48)$$

$$S_k \geq a_{-c_k}, \quad \forall k \in K, \quad (49)$$

$$S_k \leq b_{-c_k}, \quad \forall k \in K, \quad (50)$$

$$S_k + t_{-CC_{klv_j}} - M(1 - z_{-CC_{klv_j}}) \leq S_l, \quad \forall k, l \in K, \forall v_j \in V_J, \quad (51)$$

$$S_k + t_{-CC_{klv_j}} + M(1 - z_{-CC_{klv_j}}) \geq S_l, \quad \forall k, l \in K, \forall v_j \in V_J, \quad (52)$$

$$t_{-DC_{jkv_j}} - M(1 - x_{-DC_{jkv_j}}) \leq S_k, \quad \forall k \in K, \forall v_j \in V_J, \forall j \in J, \quad (53)$$

$$t_{-DC_{jkv_j}} + M(1 - x_{-DC_{jkv_j}}) \geq S_k, \quad \forall k \in K, \forall v_j \in V_J, \forall j \in J, \quad (54)$$

$$EM_{-total} - MD_{ij} \geq y_{-MD_{ija}} \cdot (CEF + (VEF \cdot \lambda \cdot dis_{-MD_{ij}})) - \quad (55)$$

$$M(1 - x_{-MD_{ija}}) - M(x_{-MD_{ijr}} + x_{-MD_{ijt}} + x_{-MD_{ijw}}), \quad \forall i \in I, \forall j \in J,$$

$$e_{-u} - MD_{ij} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_a \cdot EM_{-total} - MD_{ij})}{(LO_{\max} - M_a \cdot LF - M_a)} \right) - \quad (56)$$

$$M(1 - x_{-MD_{ija}}) - M(x_{-MD_{ijr}} + x_{-MD_{ijt}} + x_{-MD_{ijw}}), \quad \forall i \in I, \forall j \in J,$$

$$EM_total_MD_{ij} \geq y_MD_{ijr} \cdot (FE_M \cdot FC_M \cdot (dis_MD_{ij})) - \quad (57)$$

$$M(1-x_MD_{ijr}) - M(x_MD_{ija} + x_MD_{ijt} + x_MD_{ijw}), \forall i \in I, \forall j \in J,$$

$$e_u_MD_{ij} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_MD_{ij})}{(LO_{\max} - M_r \cdot LF_M_r)} \right) - \quad (58)$$

$$M(1-x_MD_{ijr}) - M(x_MD_{ija} + x_MD_{ijt} + x_MD_{ijw}), \forall i \in I, \forall j \in J,$$

$$EM_total_MD_{ij} \geq y_MD_{ijt} \cdot \left(\frac{(1, -r) \cdot (\xi_f \cdot T \cdot FER)}{(1, -r) \cdot (\sqrt{W_gr} \cdot LF_M_t)} \right) - \quad (59)$$

$$M(1-x_MD_{ijt}) - M(x_MD_{ija} + x_MD_{ijr} + x_MD_{ijw}), \forall i \in I, \forall j \in J,$$

$$e_u_MD_{ij} \geq (EM_total_MD_{ij} \cdot dis_MD_{ij} \cdot wp) - \quad (60)$$

$$M(1-x_MD_{ijt}) - M(x_MD_{ija} + x_MD_{ijr} + x_MD_{ijw}), \forall i \in I, \forall j \in J,$$

$$EM_total_MD_{ij} \geq y_MD_{ijw} \cdot (FCW \cdot FEW \cdot 1 \cdot dis_MD_{ij}) - \quad (61)$$

$$M(1-x_MD_{ijw}) - M(x_MD_{ija} + x_MD_{ijr} + x_MD_{ijt}), \forall i \in I, \forall j \in J,$$

$$e_u_MD_{ij} \geq \left(\frac{(wp \cdot EM_total_MD_{ij})}{(capw \cdot 1, \dots)} \right) - \quad (62)$$

$$M(1-x_MD_{ijw}) - M(x_MD_{ija} + x_MD_{ijr} + x_MD_{ijt}), \forall i \in I, \forall j \in J,$$

$$EM_total_DC_{jk} \geq y_DC_{jkv_j} \cdot (FE_D_{v_j} \cdot FC_D_{v_j} \cdot (dis_DC_{jk})) - \quad (63)$$

$$M(1-x_DC_{jkv_j}), \forall k \in K, \forall j \in J, \forall v_j \in V_J,$$

$$e_u_DC_{jk} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_DC_{jk})}{(LO_{\max} - D_{v_j} \cdot LF_D_{v_j})} \right) - \quad (64)$$

$$M(1-x_DC_{jkv_j}), \forall k \in K, \forall j \in J, \forall v_j \in V_J,$$

$$EM_total_CC_{kl} \geq y_CC_{klv_j} \cdot (FE_D_{v_j} \cdot FC_D_{v_j} \cdot (dis_CC_{kl})) - \quad (65)$$

$$M(1-z_CC_{klv_j}), \forall k, l \in K, \forall v_j \in V_J,$$

$$e_u_CC_{kl} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_CC_{kl})}{(LO_{\max} - D_{v_j} \cdot LF_D_{v_j})} \right) - \quad (66)$$

$$M(1-z_CC_{klv_j}), \forall k, l \in K, \forall v_j \in V_J,$$

$$EM_total_CD_{Kj} \geq y_CD_{Kjv_j} \cdot (FE_D_{v_j} \cdot FC_D_{v_j} \cdot (dis_DC_{jk})) - \quad (67)$$

$$M(1-x_CD_{Kjv_j}), \forall k \in K, \forall j \in J, \forall v_j \in V_J,$$

$$e_u_CD_{kj} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_CD_{kj})}{(LO_{\max} - D_{v_j} \cdot LF - D_{v_j})} \right) - \quad (68)$$

$$M(1 - x_CD_{kv_j}), \forall k \in K, \forall j \in J, \forall v_j \in V_J$$

$$EM_total_DD_{jm} \geq y_DD_{jmv_j} \cdot (FE - D_{v_j} \cdot FC - D_{v_j} \cdot (dis_DD_{jm})) - \quad (69)$$

$$M(1 - x_DD_{jmv_j}), \forall m \in M, \forall j \in J, \forall v_j \in V_J,$$

$$e_u_DD_{jm} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_DD_{jm})}{(LO_{\max} - D_{v_j} \cdot LF - D_{v_j})} \right) - \quad (70)$$

$$M(1 - x_DD_{jmv_j}), \forall m \in M, \forall j \in J, \forall v_j \in V_J$$

$$EM_total_DM_{mi} \geq y_DM_{mir'} \cdot (FE - Di \cdot FC - Di \cdot (dis_DM_{mi}) \cdot 1.05) - \quad (71)$$

$$M(1 - x_DM_{mir'}) - M(x_DM_{mit'}), \forall m \in M, \forall i \in I,$$

$$e_u_DM_{mi} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_DM_{mi})}{(LO_{\max} - Di_{r'} \cdot LF - Di_{r'})} \right) - \quad (72)$$

$$M(1 - x_DM_{mir'}) - M(x_DM_{mit'}), \forall m \in M, \forall i \in I,$$

$$EM_total_DM_{mi} \geq y_DM_{mit'} \cdot \left(1.05 \cdot \left(\xi_h \cdot T \cdot FER \right) / \left(\sqrt{W_gr} \cdot LF - Di_{t'} \right) \right) - \quad (73)$$

$$M(1 - x_DM_{mit'}) - M(x_DM_{mir'}), \forall m \in M, \forall i \in I,$$

$$e_u_DM_{mi} \geq (EM_total_DM_{mi} \cdot dis_DM_{mi} \cdot wp) - M(1 - x_DM_{mit'}) - \quad (74)$$

$$M(x_DM_{mir'}), \forall m \in M, \forall i \in I,$$

$$x_MD_{ijv_i}, x_DC_{jkv_j}, x_DD_{jmv_j}, x_CD_{kv_j}, x_DM_{miv_m}, z_CC_{klv_j}, \alpha_i, \beta_j, \quad (75)$$

$$\gamma_m \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k, l \in K, \forall m \in M, \forall v_i \in V_I, \forall v_j \in V_J, \forall v_m \in V_M$$

$$y_MD_{ijv_i}, y_DC_{jkv_j}, y_DD_{jmv_j}, y_CD_{kv_j}, y_DM_{miv_m}, y_CC_{klv_j}, PM_i, u_k, \quad (76)$$

$$congR_k, congF_k, S_k, EM_total_MD_{ij}, EM_total_DC_{jk}, EM_total_CD_{kj},$$

$$EM_total_CC_{kl}, EM_total_DD_{jm}, EM_total_DM_{mi}, e_u_MD_{ij},$$

$$e_u_DC_{jk}, e_u_CD_{kj}, e_u_CC_{kl}, e_u_DD_{jm}, e_u_DM_{mi} \geq 0,$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k, l \in K, \forall m \in M, \forall v_i \in V_I, \forall v_j \in V_J, \forall v_m \in V_M.$$

معادله (۱) تابع هدفی را نشان می‌دهد که هزینه فعال شدن کارخانه، توزیع کننده و جداساز، هزینه مسافت‌های رفت و برگشتی و تمامی هزینه‌های عملیاتی را می‌نیم می‌کند. محدودیت‌های (۲) و (۳) به ترتیب نشان می‌دهند که حداقل یک کارخانه و یک توزیع کننده در زنجیره فعالیت می‌کنند. محدودیت (۴) تضمین می‌کند که هر کارخانه می‌تواند مقداری محصول تولید کند مادامی که برای فعالیت انتخاب شده باشد. هر کارخانه فعال حداقل

یک توزیع کننده را می‌پوشاند. این مفهوم را محدودیت (۵) نشان می‌دهد. از طرفی، هر توزیع کننده حداقل یک لینک از کارخانه‌ها دریافت می‌کند پس از این که انتخاب شده باشد (محدودیت (۶)). محدودیت (۷) مقدار جریان محصول بین کارخانه و توزیع کننده را نشان می‌دهد. محدودیت (۸) ظرفیت کارخانه‌ها را در لجستیک مستقیم محدود می‌کند. محدودیت (۹) دلالت بر این دارد که تعداد وسیله‌های در حال سفر از کارخانه نباید از تعداد موجود تجاوز کند. محدودیت (۱۰) از اختیار کردن بیش از یک وسیله بر مسیر انتخابی بین کارخانه و توزیع کننده جلوگیری می‌کند. محدودیت ظرفیت هر وسیله نقلیه در حال سفر از کارخانه به سمت توزیع کننده توسط محدودیت (۱۱) نشان داده می‌شود. محدودیت (۱۲) ضمانت می‌کند که هر توزیع کننده فعال حداقل یک مشتری را می‌پوشاند. هر توزیع کننده فعال حداقل یک لینک از مشتریان دریافت می‌کند که این مطلب را محدودیت (۱۳) نشان می‌دهد. محدودیت (۱۴) نشان می‌دهد که یک فروشنده از توزیع کننده می‌بایست حداقل دو مشتری را ملاقات و تامین کند. محدودیت (۱۵) بیان می‌دارد که هر مشتری توسط یک توزیع کننده یا مشتری دیگر لینک می‌شود. همچنین یا به یک توزیع کننده برمی‌گردد و یا به دیگر مشتری لینک می‌شود که این مفهوم توسط محدودیت (۱۶) نشان داده می‌شود. هر مشتری توسط وسیله نقلیه مشابهی تامین می‌شود و نیز تامین می‌کند. محدودیت (۱۷) این مفهوم را می‌رساند. محدودیت‌های (۱۸-۲۰) از هر گونه مسیر بسته‌ای در شبکه جلوگیری می‌کنند. محدودیت (۲۱) مقدار محصول جمع‌آوری شده برای تامین دیگر مشتریان در هر مشتری را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۲) نمایانگر میزان جریان میان توزیع کننده و مشتری است. محدودیت (۲۳) برای تامین تقاضای مشتریان معرفی شده است. محدودیت ظرفیت هر وسیله نقلیه در حال سفر از توزیع کننده به مشتری توسط محدودیت (۲۴) نشان داده می‌شود. محدودیت (۲۵) دلالت دارد که تعداد وسیله‌های نقلیه در حال سفر از توزیع کننده از تعداد موجود تجاوز نخواهد کرد. محدودیت (۲۶) قانون حفظ جریان را رعایت می‌کند. میزان محصول جمع‌آوری شده برای امر بهبود از دیگر مشتریان در هر مشتری توسط محدودیت (۲۷) نشان داده می‌شود. محدودیت‌های (۲۸-۲۹) میزان جریان بین مشتری و توزیع کننده را نشان می‌دهند. میزان جریان میان مشتریان توسط محدودیت (۳۰) نشان داده می‌شود. محدودیت (۳۱) تضمین می‌کند که هر جداساز فعالی حداقل یک لینک از توزیع کنندگان دریافت می‌نماید. محدودیت (۳۲) از اختیار کردن بیش از یک وسیله بر مسیر انتخابی بین توزیع کننده و جداساز جلوگیری می‌کند. محدودیت (۳۳) بر این موضوع دلالت دارد که هر توزیع کننده فعالی حداقل یک جداساز را می‌پوشاند. میزان جریان بین توزیع کننده و جداساز توسط محدودیت (۳۴) نشان داده می‌شود. محدودیت (۳۵) قانون حفظ جریان را رعایت می‌کند. محدودیت (۳۶) نشان می‌دهد که جریان کلی رفت و برگشتی از میزان ظرفیت توزیع کننده تجاوز نخواهد کرد. محدودیت (۳۷) دلالت بر این موضوع دارد که تعداد وسایل نقلیه در حال سفر از توزیع کننده به سمت جداساز از تعداد موجود تجاوز نخواهد کرد. محدودیت ظرفیت هر وسیله نقلیه در حال سفر از توزیع کننده به جداساز توسط محدودیت (۳۸) نشان داده می‌شود. محدودیت (۳۹) محدودیت ظرفیت معکوس برای توزیع کنندگان را نشان می‌دهد. محدودیت (۴۰) ضمانت می‌کند که هر جداساز فعالی حداقل یک کارخانه را می‌پوشاند. محدودیت (۴۱) از اختیار کردن بیش از یک وسیله بر مسیر انتخابی بین جداساز و کارخانه جلوگیری می‌کند. محدودیت (۴۲) تضمین می‌کند که هر

کارخانه فعالی حداقل یک لینک از جداسازها دریافت می کند. میزان جریان بین جداساز و کارخانه توسط محدودیت های (۴۳) و (۴۴) نشان داده می شود. محدودیت (۴۵) قانون حفظ جریان را رعایت می کند. محدودیت (۴۶) محدودیت ظرفیت معکوس برای جداسازها را نشان می دهد. محدودیت (۴۷) دلالت بر این موضوع دارد که تعداد وسایل نقلیه در حال سفر از جداساز به سمت کارخانه از تعداد موجود تجاوز نخواهد کرد. محدودیت ظرفیت هر وسیله نقلیه در حال سفر از جداساز به کارخانه توسط محدودیت (۴۸) نشان داده می شود. محدودیت های (۴۹-۵۴) پنجره زمانی رارعایت می کند. محدودیت های (۵۵-۶۲) میزان انتشار مختص به یک واحد محصول برای حمل و نقل از i امین کارخانه به j امین توزیع کننده را نشان می دهد. جایی که، $x_{MD_{ijq} \dots x_{MD_{ijw}}$ متغیرهای باینری هستند که محدودیت های انتشار کربن را به نوع روش حمل و نقل مربوط می سازند. محدودیت های (۵۵-۵۶)، (۵۷-۵۸)، (۵۹-۶۰) و (۶۱-۶۲) به ترتیب میزان انتشار کربن هواپیما، وسیله نقلیه، قطار دیزلی و کشتی مبتنی بر روش شناسی NTM برای حمل و نقل هوایی، حمل و نقل جاده ای، حمل و نقل ریلی و حمل و نقل آبی را محاسبه می کنند.

محدودیت های (۶۳) و (۶۴) میزان انتشار اختصاص داده شده به هر واحد محصول برای حمل و نقل از j امین توزیع کننده به k امین مشتری را نشان می دهد. محدودیت های (۶۵) و (۶۶) میزان انتشار اختصاص داده شده به هر واحد محصول برای حمل و نقل از k امین مشتری به l امین مشتری را نشان می دهد. محدودیت های (۶۷) و (۶۸) میزان انتشار اختصاص داده شده به هر واحد محصول برای حمل و نقل از k امین مشتری به j امین توزیع کننده را نشان می دهد. محدودیت های (۶۹) و (۷۰) میزان انتشار اختصاص داده شده به هر واحد محصول برای حمل و نقل از j امین توزیع کننده به m امین جداساز را نشان می دهد. محدودیت های (۷۰-۶۳) میزان انتشار کربن وسیله نقلیه مبتنی بر روش شناسی NTM برای حمل و نقل جاده ای را محاسبه می کند. محدودیت های (۷۴-۷۱) میزان انتشار کربن اختصاص داده شده به هر واحد محصول برای حمل و نقل از m امین جداساز به i امین کارخانه را نشان می دهد. جایی که $x_{DM_{mir'}}$ و $x_{DM_{mit'}}$ متغیرهای تصمیمی هستند که محدودیت های میزان انتشار کربن را به نوع روش حمل و نقل مربوطه لینک می کنند. محدودیت های (۷۱-۷۲) و (۷۳-۷۴) میزان انتشار کربن وسیله نقلیه و قطار را مبتنی بر روش شناسی NTM برای حمل و نقل جاده ای و ریلی اندازه می گیرند. محدودیت (۷۵) متغیرهای باینری را نشان می دهد و محدودیت (۷۶) مابقی متغیرها را از پذیرفتن مقادیر منفی باز می دارد.

خطی‌سازی

برای بهبود مدل ریاضی پیشنهادی، عمل خطی‌سازی برای محدودیت‌های غیرخطی انجام می‌دهیم. چون محدودیت (۲۱) غیرخطی است، محدودیت‌های زیر برای تبدیل آن به فرم خطی به کار برده می‌شود به طوری که:

$$\text{Equation (۲۱)} \rightarrow \text{cong}R_k \geq M \cdot (z_{-CC_{klv_j}} - 1) + (dc_k + \text{cong}R_l), \quad \forall v_j \in V_J, \forall l, k \in K, \quad (۷۷)$$

$$\text{cong}R_k \leq (-M) \cdot (z_{-CC_{klv_j}} - 1) + (dc_k + \text{cong}R_l), \quad \forall v_j \in V_J, \forall l, k \in K, \quad (۷۸)$$

$$\text{cong}R_k \leq \left(\sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in K} z_{-CC_{klv_j}} \right) \cdot M + dc_k, \quad \forall k \in K, \quad (۷۹)$$

$$\text{cong}R_k \geq \left(\sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in K} z_{-CC_{klv_j}} \right) \cdot (-M) + dc_k, \quad \forall k \in K, \quad (۸۰)$$

چون محدودیت (۲۷) غیرخطی است، محدودیت‌های زیر برای تبدیل آن به فرم خطی به کار برده می‌شود

$$\text{Equation (۲۷)} \rightarrow \text{cong}F_k \geq M \cdot (z_{-CC_{klv_j}} - 1) + ((pr_k \cdot dc_k) + \text{cong}F_l), \quad \forall v_j \in V_J, \forall l, k \in K, \quad (۸۱)$$

$$\text{cong}F_k \leq (-M) \cdot (z_{-CC_{klv_j}} - 1) + ((pr_k \cdot dc_k) + \text{cong}F_l), \quad \forall v_j \in V_J, \forall l, k \in K, \quad (۸۲)$$

$$\text{cong}F_k \leq \left(\sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in K} z_{-CC_{klv_j}} \right) \cdot M + (pr_k \cdot dc_k), \quad \forall k \in K, \quad (۸۳)$$

$$\text{cong}F_k \geq \left(\sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in K} z_{-CC_{klv_j}} \right) \cdot (-M) + (pr_k \cdot dc_k), \quad \forall k \in K, \quad (۸۴)$$

در این قسمت، یک مثال عددی با هدف دستیابی به دید مدیریتی از مسایل انتخاب روش حمل و نقل در یک زنجیره حلقه‌بسته و همچنین نمایش اثربخشی مدل‌های ریاضیاتی پیشنهادی ارائه می‌شود. در این مطالعه، از تخمین‌های دنیای واقعی مبتنی بر روش NTM استفاده می‌شود. مدل‌های پیشنهادی در مقیاس کوچکی مورد آزمایش قرار می‌گیرند. جداول ۳-۱ داده‌های ورودی را گزارش می‌دهند. تعداد مکان‌های بالقوه کارخانجات، توزیع کنندگان و جداسازها به ترتیب ۳، ۴ و ۲ در نظر گرفته می‌شود. کارخانجات، توزیع کنندگان و جداسازها به منظور تامین ۷ مشتری با تقاضاهای معلوم انتخاب می‌شوند. در این مطالعه، چهار نوع روش حمل و نقل (هوایی، ریلی، جاده‌ای و آبی) برای انتقال محصول از کارخانجات به توزیع کنندگان، یک نوع روش حمل و نقل (جاده-ای) برای انتقال محصول از توزیع کنندگان به مشتریان و دو نوع روش حمل و نقل (ریلی و جاده‌ای) برای انتقال محصول از جداسازها به کارخانجات استفاده می‌شود.

ماکزیمم و می نیمم زمان انتظار برای مشتریان به ترتیب ۲۵۰۰ و ۵۰۰ واحد زمانی است. کارخانه، توزیع کننده، مشتری و جداساز با مشخصه‌هایی از قبیل ظرفیت، تقاضا، هزینه ثابت، هزینه تولید و نرخ در جدول ۱ نشان داده می‌شوند. سه نرخ به ترتیب متناسب با هر توزیع کننده، مشتری و جداساز متفاوت فرض می‌شوند. جدول ۲ هزینه واحد حمل و نقل را لیست می‌کند. هزینه بهبود در توزیع کننده اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۱/۵، ۲/۳، ۱/۸ و ۸/۸ می‌باشد. جدول ۳ خصوصیات وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. وزن و حجم محصول به ترتیب ۴۰ (kg) و ۵/۵ (m^3) است. ماکزیمم (Q) و می نیمم (L) تعداد مشتریانی که یک فروشنده می‌بایست ملاقات کند به ترتیب ۴ و ۱ فرض می‌شود. هزینه ثابت دفع نیز ۲ یورو به ازای هر واحد در نظر گرفته می‌شود. چون قیمت بازاری کربن بین ۱ تا ۳۰ یورو به ازای هر تن نوسان می‌کند، بنابراین متوسط هزینه آن را که ۱۵ یورو است برای مدل-های پیشنهادی در نظر می‌گیریم [۱۲].

جدول ۱. ظرفیت، تقاضا، هزینه ثابت، هزینه تولید و نرخ

تولید کننده			توزیع کننده			مشتري		جدا ساز		
ظرفیت	هزینه تولید	ظرفیت کل	هزینه توزیع	درصد ظرفیت	تقاضا	درصد بهرورد	ظرفیت	هزینه توزیع	درصد دفع	
۱۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۳۲۶	۸۰۰۰	۴۰	۲۰	۱۰	۱۶۰۰	۲۰۰۰	۳۰	
۱۰۰۰۰۰	۱۸۰۰۰	۴۰۰	۵۰۰۰	۲۰	۱۸	۳۰	۲۴۰۰	۲۵۰۰	۳۸	
۱۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۳۰۰	۱۵۰۰	۵۰	۱۰	۵۰				
		۲۰۰۰	۳۰۰۰۰	۵۰	۱۲	۲۰				
					۲۰	۸۰				
					۱۴	۱۰				
					۱۰	۴۰				

مهاجری و فلاح، مدل کمینه‌سازی هزینه برای کاهش کربن ناشی از روش‌های مختلف حمل و نقل

جدول ۲. هزینه واحد حمل و نقل به ازای کیلومتر (یورو)

تولید کننده	توزیع کننده			
	کشتی	قطار	کامیون	هواپیمای باری
	۳/	۲/	۱۶/	۲۵/
توزیع کننده	مشتری/جداساز			
	کامیون ۴۰ تنی	کامیون ۵ تنی		
	۱۸/	۱۳/		
جداساز	تولید کننده			
	قطار	کامیون		
	۲۵/	۱۵/		

جدول ۳. خصوصیات وسایل نقلیه

وسیله نقلیه	تعداد				ماکزیمم بار	ظرفیت	چگالی محصول
	تولید کننده						
	۱	۲	۳	۴			
هواپیمای باری	۲	۱	۲		۲۹۰۲۹	۲۹۰۲۹	۱۶۷
کامیون	۵	۳	۶		۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۲۵۰
قطار	۱	۰	۱		۱۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	-
کشتی	۳	۲	۲		۱۹۲۰۰۰۰	۱۹۲۰۰۰۰	-
توزیع کننده							
	۱	۲	۳	۴			
کامیون ۵ تنی	۵	۳	۱۰	۴	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۲۵۰
کامیون ۴۰ تنی	۳	۶	۶	۱	۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۲۵۰
جداساز							
	۱	۲	۳	۴			
کامیون	۴		۳		۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۲۵۰
کشتی	۱		۲		۱۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	-

تا اینجا، داده‌های لازم برای پردازش نتایج فراهم شدند. به منظور سهولت محاسبات در مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته (MIP)، از بسته نرم افزاری GAMS 22.9 استفاده می‌شود. پس از حل مدل کمینه‌سازی هزینه انتشار با استفاده از این بسته نرم افزاری، این نتیجه حاصل شد که میزان انتشار کلی برای این مساله ۱۲۴۲/۸۹ کیلوگرم می‌باشد.

نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها توسط نرم افزار در جدول ۴ به همراه حل بهینه مدل گزارش داده می‌شود. صحت و اثربخشی مدل برای مثال عددی داده شده در شکل ۱ به صورت شماتیکی نشان داده می‌شود. تابع هدف مدل در جدول ۴ ارایه می‌شود. نرخ‌های جریان محصول و مقدار گاز دی اکسید کربن منتشره به وسیله وسایل

نقلیه در مسیرهای منتخب نیز در همین جدول ۵ نشان داده می شود. همان طور که قبلاً نیز گفتیم در کل ۵ نوع لینک ارتباطی در شبکه وجود دارند که در ستون مسیرهای منتخب جدول مشاهده می شوند:

- لینک های ارتباطی میان کارخانجات و توزیع کننده ها توسط شمای $a-b: [n]$ نشان داده می شود. a و b به ترتیب شماره کارخانه ها و توزیع کننده های فعال و منتخب را نشان می دهد. n شماره ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می شود. $[]$ نماد مربوط به این نوع لینک های ارتباطی است.
 - لینک های ارتباطی میان توزیع کننده ها و مشتریان توسط شمای $c-d: (n)$ نشان داده می شود. c و d به ترتیب شماره توزیع کننده های فعال و منتخب و مشتریان را نشان می دهند و برعکس. n شماره ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می شود. $()$ نماد مربوط به این نوع لینک های ارتباطی است.
 - لینک های ارتباطی مابین مشتریان توسط شمای $e-f: \{n\}$ نشان داده می شود. e و f به ترتیب شماره مشتریان انتخاب شده را نشان می دهند. n شماره ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می شود. $\{ \}$ نماد مربوط به این نوع لینک های ارتباطی است.
 - لینک های ارتباطی میان توزیع کننده ها و جداسازها توسط شمای $g-h: \langle n \rangle$ نشان داده می شود. g و h به ترتیب شماره توزیع کننده ها و جداسازهای فعال و منتخب را نشان می دهند. n شماره ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می شود. $\langle \rangle$ نماد مربوط به این نوع لینک های ارتباطی است.
- لینک های ارتباطی میان جداسازها و کارخانجات توسط شمای $i-j: ||n||$ نشان داده می شود که i و j به ترتیب شماره جداسازها و کارخانجات فعال و منتخب را نشان می دهند. n شماره ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می شود. $|| ||$ نماد مربوط به این نوع لینک های ارتباطی است.
- زنجیره حلقه بسته بهینه برای مدل پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده می شود. در این شکل، از رنگ های متنوعی برای مشخص کردن مسیر که در آن یک فروشنده از توزیع کننده منتخبی حرکت می کند و به مشتریان تحت پوشش می رسد استفاده می شود. بنابراین، مسیرهای انتخابی داده شده در جدول ۴ با رنگ های متنوعی نشان داده می شوند. تابع هدف برای مدل برابر $233765/9$ واحد هزینه در مدت زمان ۱۳۸۰ ثانیه است. شایان ذکر است که این زمان محاسباتی مدت زمانی است که برای حل مساله با ۳، ۴ و ۲ مکان بالقوه برای کارخانه، توزیع کننده و جداساز و ۷ مشتری صرف می شود.
- مسیرهای مناسب برای تحویل محصول به مشتریان از سمت کارخانجات و توزیع کنندگان در جریان های مستقیم، برای تحویل محصول بهبودی به جداسازها از سمت توزیع کنندگان و مشتریان و برای تحویل محصولات بازاستفاده برای کارخانجات از سمت جداسازها در جریان های معکوس برای مدل در شکل ۱ نمایان می شوند. همچنین، وسایل حمل و نقل انتخابی برای حمل محصول و میزان محصول مربوطه نیز در این شکل نشان داده می شود. میزان انتشار گاز دی اکسید کربن (kg) توسط وسیله نقلیه انتخابی بر روی هر مسیر منتخب و میزان دفع نیز در این شکل قابل رویت می باشد. زمان تحویل محصول در هر مشتری برای مدل پیشنهادی در جدول ۵ ارایه می شود. اگر چراغ راهنما همگی سبز باشند به منزله این است که پنجره زمانی هر مشتری رعایت گردیده و زمان تحویل محصول در بازه مجاز (۲۵۰۰-۵۰۰) است.

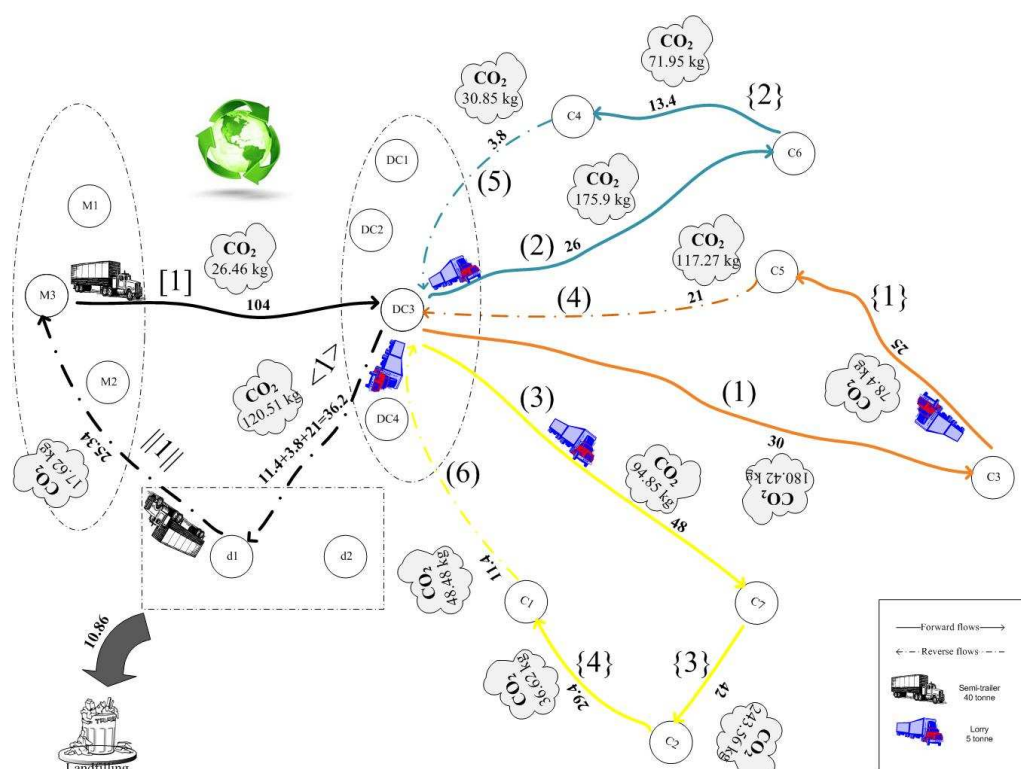
مهاجری و فلاح، مدل کینماتیک حریر برای کاهش کربن ناشی از روش های مختلف حمل و نقل

جدول ۴. نتایج حل مدل

مسیرهای منتخب	مقدار محصول	میزان گاز دی اکسید کربن منتشره
۳-۳: [۱]	۱۰۴	۲۶/۴۶
۳-۳: (۱)	۳۰	۱۸۰/۴۲
۳-۶: (۲)	۲۶	۱۷۵/۹
۳-۷: (۳)	۴۸	۹۴/۸۵
۳-۵: {۱}	۲۵	۷۸/۴
۶-۴: {۲}	۱۳/۴	۷۱/۹۵
۷-۲: {۳}	۴۲	۲۴۳/۵۶
۲-۱: {۴}	۲۹/۴	۳۶/۶۲
۵-۳: (۴)	۲۱	۱۱۷/۲۷
۴-۳: (۵)	۳/۸	۳۰/۸۵
۱-۳: (۶)	۱۱/۴	۴۸/۴۸
۳-۱: <۱>	۳۶/۲	۱۲۰/۵۱
۱-۳: ۱	۲۵/۳۴	۱۷/۶۲
دفع	۱۰/۸۶	-
هدف		
۲۳۳۷۶۵/۹		

جدول ۵. پنجره زمانی

مشتري	پنجره زمانی	وضعیت
۱	۱۲۲۱	 → 
۲	۱۰۴۱	 → 
۳	۷۸۰	 → 
۴	۱۱۸۲	 → 
۵	۸۸۵	 → 
۶	۱۰۸۴	 → 
۷	۹۴۷	 → 



شکل ۱. زنجیره حلقه بسته بهینه مثال عددی

۵ نتیجه گیری

در این مطالعه، یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته به منظور یکپارچه سازی سیستم لجستیک با مقوله زیست محیطی ارائه شد. زنجیره پیشنهادی ما شامل ۴ لایه (تولید کننده، توزیع کننده، مشتری و جداساز) می باشد. یافتن مکان های بهینه کارخانجات، توزیع کننده ها و جداسازها و توزیع بهینه محصول با رعایت پنجره زمانی، اهداف دنبال شده ما توسط برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته بودند. در این راه، از رویکرد چند توزیع کننده چند فروشنده دوره گرد (MDMTSP) میان لایه های توزیع کنندگان و مشتریان استفاده کردیم. به علاوه، برای مدیریت هر چه بهتر لجستیک معکوس به منظور کاهش اثرات منفی انتشار گازهای گلخانه ای، بر روی انتخاب نوع روش حمل و نقل به عنوان راهی برای کاهش میزان انتشار تمرکز کردیم. برای این منظور، قانون کاهش شدت انتشار کربن ناشی از حمل بار در نظر گرفته شد. این مکانیزم، هزینه ای را برای انتشار کربن مشخص می کرد. در نتیجه، مدل متعاقب با این قانون فرمول بندی شد. میزان توانایی و اثربخشی مدل پیشنهادی با مثال های عددی نشان داده شد.

منابع

- [۱] مرادی، م.، صلاحی، م.، بردسیری، م.، جمالیان، ع.، (۱۳۹۳). یک مدل جدید استوار در طراحی شبکه زنجیره تامین تحت عدم قطعیت. مجله تحقیقات در عملیات در کاربردهای آن، ۱۱(۲)، ۲۶-۹.

- [2] Fazlollahtabar, H., Mahdavi, I., Mohajeri, A., (2013). Applying fuzzy mathematical programming approach to optimize a multiple supply network in uncertain condition with comparative analysis. *Applied Soft Computing*, 13, 550-562.
- [3] Roy, D., Anciaux, D., Monteiro, T., Ouzizi, L., (2004). Multi-agent architecture for supply chain management. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15(8), 745–755.
- [4] Hyung, J. A., Sung, J. P., (2003). Modeling of a multi-agent system for coordination of supply chains with complexity and uncertainty. in: *PRIMA, LNAI*, 2891, 13–24.
- [5] Fazlollahtabar, H., Hajmohammadi, H., Mohajeri, A., (2012). Designing an Electronic Supply Chain Management System in an Electronic Market Considering Customer Satisfaction and Logistic. *International Journal of Customer Relationship Marketing and Management*, 3(3), 74-88.
- [6] Dekkera, R., Bloemhof, J., Mallidis, I., (2012). Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219, 671–679.
- [7] Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Van Wassenhove, L. N., (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 10(2), 156–73.
- [8] Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q., (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1063–77.
- [9] Uster, H., Easwaran, G., Çetinkaya, E. A. S., (2007). Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. *Naval Research Logistics*, 54(8), 890–907.
- [10] Wang, H. F., Hsu, H. W., (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers & Operations Research*, 37, 376 – 389.
- [11] Van der Laan, E., Salomon, M., Dekker, R., Van Wassenhove, L., (1999). Inventory control in hybrid systems with remanufacturing. *Management Science*, 45(5), 733–47.
- [12] Hoen, K. M. R., Tan, T., Fransoo, J. C., Van Houtum, G. J., (2012). Effect of carbon emission regulations on transport mode selection in supply chains. *Flexible Services and Manufacturing Journal*.