

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

امیر مهاجری*^۱، 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 فرمول بندی 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 جریان های مالی. هماهنگی و یکپارچه سازی این جریانات در طول زنجیره یک شرکت مقوله مدیریت زنجیره تامین (SCM) را معرفی می کنند [5].

رشد اقتصادی در حد فاصل قرن بیستم تا قرن بیست و یکم منجر به افزایش در مصرف کالاها شده است. بنابراین، جریان های 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 آورده اند [6].

یکپارچه سازی 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 سال های 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 می کند.

در سیستم های زنجیره تامین حلقه بسته / لجستیک معکوس، محصول پس از استفاده به تولید کننده بازمی گردد و می تواند تعمیر و برای تحویل مجدد به مشتری باز تولید شود. مقوله زیست محیطی داغ برای یک شرکت، چگونگی کاهش استفاده از مواد به وسیله استفاده و باز تولید مجدد محصولات مصرف شده است. با این رویکرد مدیریت زنجیره تامین سبز وارد فاز جدیدی به نام مدیریت زنجیره تامین حلقه بسته می شود. با مدیریت خوب لجستیک معکوس، حفاظت از محیط زیست با کمینه کردن تمامی هزینه ها در سرتاسر زنجیره تامین مقدور می باشد.

اکثر مقالات بر لجستیک معکوس تمرکز کرده اند و فقط مدل های مربوط به این حوزه را فرمول بندی کرده اند. بعضی محققان پا را فراتر نهاده و مدل های حلقه بسته را در نظر گرفته اند اما باز این ها نیز ارتباط فی مابین جریانات رفت و برگشتی لحاظ نکرده اند [7-9]. این مدل ها اغلب ظرفیت های نامحدودی را برای لجستیک معکوس فرض می کردند 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 می کنند و رابطه جریانات رفت و برگشت را نیز در نظر می گیرند [10]. در این مقاله، یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ای را طراحی می کنیم که نه تنها ارتباط فی مابین جریانات رفت و برگشت را در نظر می گیرد که در آن ظرفیت برای لجستیک معکوس نیز محدود فرض می شود.

با مرور بر ادبیات زنجیره تامین که در بالا ارایه شد می توان فهمید که مقالات کمی ارتباط میان لجستیک های مستقیم و برگشت را در نظر می گیرند. در مطالعه حاضر، مدل ارایه شده توسط وانگ و سو در سال 2010 به منظور حمایت بیشتر از محیط زیست توسعه داده می شود [10]. اول از همه، علاوه بر مدیریت صحیح و مناسب لجستیک معکوس به منظور کاهش اثرات منفی انتشارات گازهای گلخانه ای، استراتژی دیگری نیز برای دستیابی به این هدف والا به طور همزمان در نظر گرفته می شود. در این مطالعه، ما بر روی جنبه مهم و تاثیر گذار زنجیره تامین سبز تمرکز می کنیم: ما بر روی انتخاب نوع روش حمل و نقل به عنوان راهی جهت کاهش میزان انتشار گاز تمرکز می کنیم.

ادغام یا یکپارچه‌سازی 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 هزینه‌های کلی در سرتاسر زنجیره تامین حلقه بسته، قانونی برای کاهش میزان انتشار ناشی از حمل محوله‌ها در نظر گرفته می‌شود. این مکانیزم هزینه‌ای برای میزان انتشار گاز در نظر می‌گیرد. در این مقاله، یک سناریو پیش برده می‌شود و برای این سناریو و مرتبط با قانون ذکر شده مساله‌ای فرمول‌بندی می‌شود. این سناریو عبارت است از:

- مدل به همراه میزان انتشار (مساله می‌نیم‌سازی هزینه انتشار)

ما در این مطالعه، از داده‌های تجربی به منظور تخمینی درست برای میزان انتشار گاز ناشی از انواع مختلف روش‌های حمل و نقل استفاده می‌کنیم. میزان انتشار کربن برای سناریو لحاظ می‌گردد جایی که موازنه‌ای 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 کوتاهتر، 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 می‌گیرد. پس از آن، در قسمت سوم فرمول-بندی ریاضی برای سناریو و در قسمت چهارم مثال عددی به منظور صحت و اثربخشی روش ارایه می‌گردند. در پایان نتیجه‌گیری مطرح می‌گردد.

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 می‌شوند، انواع مختلف روش حمل و نقل و یک کالا با تقاضاهای معین و قطعی در نظر گرفته می‌شوند. اولین مساله، تصمیم‌گیری درباره انتخاب مکان‌های مناسب برای تولید کننده، توزیع کننده و جداسازها از میان مناطق جانشین است به نحوی که با رعایت محدودیت‌های موجودی و راضی نگه داشتن مشتریان به لحاظ تقاضا هزینه‌های عملیاتی و میزان انتشار کربن حداقل و سود حداکثر گردند. توزیع محصول از مراکز توزیع به مشتریان نقش حیاتی در این خصوص بازی می‌کند. رویکرد MDMTSP می‌تواند برای این منظور مفید باشد. هر فروشنده مستقر در توزیع کننده می‌بایست حرکت کند و مشتریان را ملاقات کند و سپس به توزیع کننده برگردد. در این مساله، فرض می‌کنیم که هر مشتری تنها توسط یک توزیع کننده تامین می‌شود. در ضمن، تمامی تقاضاها تامین می‌شوند. در این مطالعه، شروط اساسی زنجیره تامین حلقه بسته به‌عنوان فرضیات مساله در نظر گرفته می‌شوند که عبارتند از:

- تقاضاهای مشتریان می‌بایست تامین شوند.
- از جریان انتقالی بین دو مرحله نامتوالی می‌بایست جلوگیری شود.
- تعداد تسهیلات فعال و ظرفیت‌های مربوطه می‌بایست 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 به‌عنوان 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 حلقه‌بسته در زنجیره تامین است. در این مطالعه، زنجیره تامین حلقه بسته‌ای با هدف کمینه‌کردن 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 مدل‌سازی ریاضی

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

مدل کمینسازی هزینه انتشار

هدف مدل پایه پیشنهادی، کمینسازی 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 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 آمین توزیع کننده به m آمین 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_cost_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 کینزسازی خریز 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 $(\text{metric})\text{tonne emissions}/\text{€}$)	CE

متغیرهای تصمیم

اگر یک محصول توسط وسیله نقلیه v_j از تولید کننده i به توزیع کننده j حمل شود عدد یک و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می گیرد.	$x - MD_{ijv_j}$
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	$y_{-CD_{kqv_j}}$
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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$y_{-DC_{jkv_j}} \geq \gamma - M (1 - x_{-DC_{jkv_j}}), \quad \forall k \in K, \forall v_j \in V_J, \forall j \in J, \quad (22)$$

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

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

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

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

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

$$y_{-CD_{kqv_j}} \geq \gamma - M (1 - x_{-CD_{kqv_j}}), \quad \forall k \in K, \forall v_j \in V_J, \forall j \in J, \quad (28)$$

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

$$y_{-CC_{klv_j}} \geq \left(\sum_{j \in J} y_{-DC_{jkv_j}} + \sum_{h \in K} y_{-CC_{hkv_j}} \right) - [(1 - pr_k) \cdot dc_k] - M (1 - z_{-CC_{klv_j}}), \quad (30)$$

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

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} x_{-DD_{jmv_j}} \geq \gamma - M (1 - \gamma_m), \quad \forall m \in M, \quad (31)$$

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

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{m \in M} x_{-DD_{jmv_j}} \geq \gamma - M (1 - \beta_j), \quad \forall j \in J, \quad (33)$$

$$y_{-DD_{jmv_j}} \geq \gamma - M (1 - x_{-DD_{jmv_j}}), \quad \forall j \in J, \forall m \in M, \forall v_j \in V_J, \quad (34)$$

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

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

$$\sum_{m \in M} x_{-DD_{j m v_j}} \leq N V D_{j v_j}, \quad \forall j \in J, \forall v_j \in V_J, \quad (37)$$

$$w p \cdot y_{-DD_{j m v_j}} \leq C V D_{v_j} \cdot L F_{-D_{v_j}}, \quad \forall j \in J, \forall m \in M, \forall v_j \in V_J, \quad (38)$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{m \in M} y_{-DD_{j m v_j}} \leq [P c_j \cdot T c_j \cdot \beta_j], \quad \forall j \in J, \quad (39)$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\sum_{i \in I} x_{-DM_{m i v_m}} \leq N V D_{i v_m}, \quad \forall m \in M, \forall v_m \in V_M, \quad (47)$$

$$w p \cdot y_{-DM_{m i v_m}} \leq C V D_{i v_m} \cdot L F_{-D_{i v_m}}, \quad \forall m \in M, \forall i \in I, \forall v_m \in V_M, \quad (48)$$

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

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

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

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

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

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

$$E M_{-total} - M D_{ij} \geq y_{-MD_{ija}} \cdot (C E F + (V E F \cdot \lambda \cdot \nu \cdot d i s_{-M D_{ij}})) - \quad (55)$$

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

$$e_{-u} - M D_{ij} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_a \cdot E M_{-total} - M D_{ij})}{(L O_{max} - M_a \cdot L F_{-M_a})} \right) - \quad (56)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$e_{-u}_{-CD_{kj}} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_r \cdot EM_{-total}_{-CD_{kj}})}{(LO_{max}_{-D_{v_j}} \cdot LF_{-D_{v_j}})} \right) - \quad (68)$$

$$M(1-x_{-CD_{k'v_j}}), \forall k \in K, \forall j \in J, \forall v_j \in V_J$$

$$EM_{-total}_{-DD_{jm}} \geq y_{-DD_{jmv_j}} \cdot (FE_{-D_{v_j}} \cdot FC_{-D_{v_j}} \cdot (dis_{-DD_{jm}})) - \quad (69)$$

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

$$e_{-u}_{-DD_{jm}} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_r \cdot EM_{-total}_{-DD_{jm}})}{(LO_{max}_{-D_{v_j}} \cdot LF_{-D_{v_j}})} \right) - \quad (70)$$

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

$$EM_{-total}_{-DM_{mi}} \geq y_{-DM_{mir'}} \cdot (FE_{-Di} \cdot FC_{-Di} \cdot (dis_{-DM_{mi}}) \cdot 1.05) - \quad (71)$$

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

$$e_{-u}_{-DM_{mi}} \geq \left(\frac{(v \cdot \rho_r \cdot EM_{-total}_{-DM_{mi}})}{(LO_{max}_{-Di_{r'}} \cdot LF_{-Di_{r'}})} \right) - \quad (72)$$

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

$$EM_{-total}_{-DM_{mi}} \geq y_{-DM_{mir'}} \cdot \left(1.05 \cdot \frac{(\xi_h \cdot T \cdot FER)}{1.05 \cdot (\sqrt{W_{-gr}} \cdot LF_{-Di_{r'}})} \right) - \quad (73)$$

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

$$e_{-u}_{-DM_{mi}} \geq (EM_{-total}_{-DM_{mi}} \cdot dis_{-DM_{mi}} \cdot wp) - M(1-x_{-DM_{mir'}}) - \quad (74)$$

$$M(x_{-DM_{mir'}}), \forall m \in M, \forall i \in I,$$

$$x_{-MD_{ijv_i}}, x_{-DC_{jkv_j}}, x_{-DD_{jmv_j}}, x_{-CD_{k'v_j}}, x_{-DM_{miv_m}}, z_{-CC_{klv_j}}, \alpha_i, \beta_j, \quad (75)$$

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

$$y_{-MD_{ijv_i}}, y_{-DC_{jkv_j}}, y_{-DD_{jmv_j}}, y_{-CD_{k'v_j}}, y_{-DM_{miv_m}}, y_{-CC_{klv_j}}, PM_i, u_k, \quad (76)$$

$$congR_k, congF_k, S_k, EM_{-total}_{-MD_{ij}}, EM_{-total}_{-DC_{jk}}, EM_{-total}_{-CD_{kj}},$$

$$EM_{-total}_{-CC_{kl}}, EM_{-total}_{-DD_{jm}}, EM_{-total}_{-DM_{mi}}, e_{-u}_{-MD_{ij}},$$

$$e_{-u}_{-DC_{jk}}, e_{-u}_{-CD_{kj}}, e_{-u}_{-CC_{kl}}, e_{-u}_{-DD_{jm}}, e_{-u}_{-DM_{mi}} \geq 0,$$

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

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 (۲۰-۱۸) 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 رارعايت 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، $x_{MD_{ija}...x_{MD_{ijw}}$ 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 (۶۳-۷۰) میزان انتشار کربن وسیله نقلیه مبتنی بر روش شناسی NTM برای حمل و نقل جاده ای را محاسبه می کند. محدودیت های (۷۱-۷۴) 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 $x_{DM_{mir'}}$ 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.

خطی سازی

برای بهبود مدل ریاضی پیشنهادی، عمل خطی سازی برای محدودیت های غیرخطی انجام می دهیم. چون محدودیت (۲۱) غیرخطی است، محدودیت های زیر برای تبدیل آن به فرم خطی به کار برده می شود 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، محدودیت های زیر برای تبدیل آن به فرم خطی به کار برده می شود

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

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

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

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

۴ مثال عددی

در این قسمت، یک مثال عددی با هدف دست یابی به دید مدیریتی از مسایل انتخاب روش حمل و نقل در یک زنجیره حلقه بسته و همچنین نمایش اثربخشی مدل های ریاضیاتی پیشنهادی ارائه می شود. در این مطالعه، از تخمین های دنیای واقعی مبتنی بر روش NTM استفاده می شود. مدل های پیشنهادی در مقیاس کوچکی مورد آزمایش قرار می گیرند. جداول ۱-۳ داده های ورودی را گزارش می دهند. تعداد مکان های بالقوه کارخانجات، توزیع کنندگان و جداسازها به ترتیب ۳، ۴ و ۲ در نظر گرفته می شود. کارخانجات، توزیع کنندگان و جداسازها به منظور تامین ۷ مشتری با تقاضاهای معلوم انتخاب می شوند. در این مطالعه، چهار نوع روش حمل و نقل (هوایی، ریلی، جاده ای 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 جاده ای) برای انتقال محصول از جداسازها به کارخانجات استفاده می شود.

ماکزیمم و می نیمم زمان انتظار برای مشتریان به ترتیب ۲۵۰۰ و ۵۰۰ واحد زمانی است. کارخانه، توزیع کننده، مشتری و جداساز با مشخصه هایی از قبیل ظرفیت، تقاضا، هزینه ثابت، هزینه تولید و نرخ در جدول ۱ نشان داده می شوند. سه نرخ به ترتیب متناسب با هر توزیع کننده، مشتری و جداساز متفاوت فرض می شوند. جدول ۲ هزینه واحد حمل و نقل را لیست می کند. هزینه بهبود در توزیع کننده اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۱/۵، ۲/۳، ۱/۸ و ۱/۸ می باشد. جدول ۳ خصوصیات وسایل نقلیه را نشان می دهد. وزن و حجم محصول به ترتیب ۴۰ (kg) و ۵ (m³) است. ماکزیمم (Q) و می نیمم (L) تعداد مشتریانی که یک فروشنده می بایست ملاقات کند به ترتیب ۴ و ۱ فرض می شود. هزینه ثابت دفع نیز ۲ یورو به ازای هر واحد در نظر گرفته می شود. چون قیمت بازاری کربن بین ۱ تا ۳۰ یورو به ازای هر تن نوسان می کند، بنابراین متوسط هزینه آن را که ۱۵ یورو است برای مدل های پیشنهادی در نظر می گیریم [۱۲].

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

تولید کننده		توزیع کننده			مشتری		جداساز			
ظرفیت	هزینه ثابت	ظرفیت	هزینه ثابت	ظرفیت	ظرفیت	درصد بهبود	ظرفیت	هزینه ثابت	درصد دفع	
۱۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	۳۲۶	۳۰۰۰	۸۰۰۰۰	۴۰	۲۰	۱۰	۱۶۰۰	۲۰۰۰۰	۳۰
۱۰۰۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰	۴۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰۰	۲۰	۱۸	۳۰	۲۴۰۰	۲۵۰۰۰	۳۸
۱۰۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۳۰۰	۱۵۰۰	۲۳۰۰۰	۵۰	۱۰	۵۰			
			۲۰۰۰	۳۰۰۰۰	۵۰	۱۲	۲۰			
						۲۰	۸۰			
						۱۴	۱۰			
						۱۰	۴۰			

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

تولید کننده	توزیع کننده			
	کشتی	قطار	کامیون	هوایمای 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							
هوایمای 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	-				
تولید کننده	توزیع کننده				ماکزیمم بار	ظرفیت	چگالی محصول				
	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	تعداد				ماکزیمم بار	ظرفیت	چگالی محصول				
	۱	۲									
	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 کینه‌سازی 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

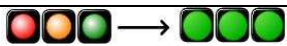
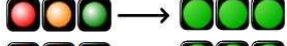

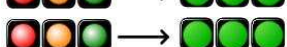
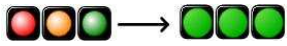


نقلیه در مسیرهای منتخب نیز در همین جدول ۵ نشان داده می شود. همان طور که قبلاً نیز گفتیم در کل ۵ نوع لینک ارتباطی در شبکه وجود دارند که در ستون مسیرهای منتخب جدول مشاهده می شوند:

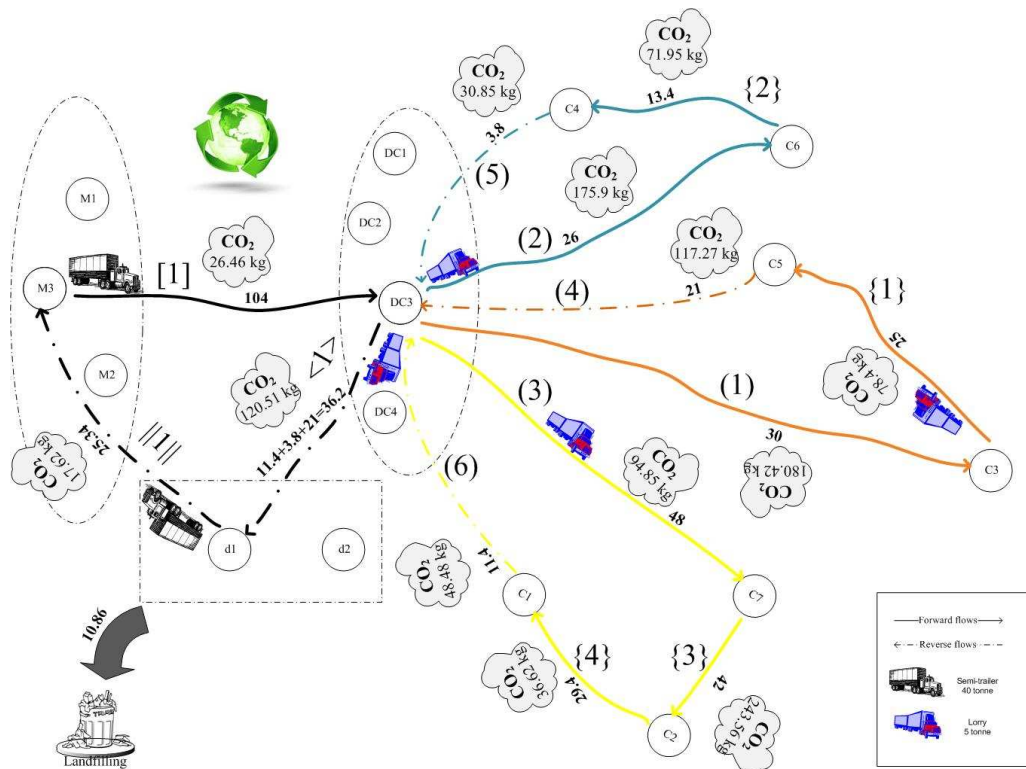
- لینک های ارتباطی میان کارخانجات و توزیع کننده ها توسط شمای $a-b: [n]$ نشان داده می شود. b و a به ترتیب شماره کارخانه ها و توزیع کننده های فعال و منتخب را نشان می دهد. n شماره ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می شود. $[]$ نماد مربوط به این نوع لینک های ارتباطی است.
 - لینک های ارتباطی میان توزیع کننده ها و مشتریان توسط شمای $c-d: (n)$ نشان داده می شود. d و c 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. f و e 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. h و g 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 $\|n\|$ 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.

جدول ۴. نتایج حل مدل

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

جدول ۵. پنجره زمانی

مشتری	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 تحقیق 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*.