مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال دوازدهم، شماره سوم (پیاپی ۴۶)، پاییز۹۴، ص ص ۲۲-۱
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

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 درنظرگرفتن همزمان اهداف سودمندی و زیست‌محیطی فرمول‌بندی می‌شود. در این راه، اهداف زیست‌محیطی با کاهش میزان کلی گاز دی اکسید کربن منتشره از حمل و نقل به‌دست می‌آید. به‌علاوه، معیار سودمندی می‌تواند در شبکه حلقه‌ای با کمینه‌کردن 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. بدین‌وسیله، به اهدافی از قبیل کمینه‌کردن تمامی هزینه‌ها و تحویل‌ها در طول زنجیره تامین نایل می‌آیند[۳-۱]. زنجیره تامین، شبکه‌ایست مشتمل بر تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان و مشتریان که در آن مواد خام از تامین‌کنندگان 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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

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

رشد اقتصادی در حد فاصل قرن بیستم تا قرن بیست ویکم منجر به افزایش در مصرف کالاها شده است. بنابراین، جریان‌های عظیم کالاها در سرتاسر جهان شکل گرفته‌است. در این راه، تولید و تمامی جوانب امور لجستیکی از قبیل حمل و نقل و انبارداری، مسایل زیست‌محیطی فراوانی از قبیل گرم‌شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی را به‌وجود 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 می کند.

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 زیست‌محیطی داغ برای یک شرکت، چگونگی کاهش استفاده از مواد به‌وسیله استفاده و بازتولید مجدد محصولات مصرف‌شده 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 کمینه‌کردن 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 جریانات رفت و برگشتی لحاظ نکرده‌اند[۹-۷]. 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 جریانات 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 جریانات رفت و برگشت را در نظر می‌گیرد که در آن ظرفیت برای لجستیک معکوس نیز محدود فرض می‌شود.

با مرور برادبیات 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 به‌عنوان راهی جهت کاهش میزان انتشار گاز تمرکز می‌کنیم.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

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 کمینه‌کردن هزینه‌های کلی در سرتاسر زنجیره تامین حلقه بسته، قانونی برای کاهش میزان انتشار ناشی از حمل محوله‌ها درنظرگرفته می‌شود. این مکانیزم هزینه‌ای برای میزان انتشار گاز درنظرمی‌گیرد. 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 می‌نیمم‌سازی 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 جایی‌که 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 بیش‌تری نسبت به حمل و نقل دریایی دارد.

در ادامه، مساله پیشنهادی با جزییات بیش‌تر 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: تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان و جداسازها. در مطالعه حاضر، تعدادی تولیدکننده، توزیع‌کننده، جداساز و مشتری که همگی توسط یک تامین‌کننده 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 تولیدکننده، توزیع‌کننده و جداسازها از میان مناطق جانشین است به نحوی که با رعایت محدودیت‌های موجودی و راضی نگهداشتن 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 توزیع‌کننده می‌بایست حرکت کند و مشتریان را ملاقات کند و سپس به توزیع‌کننده برگردد. در این مساله، فرض می‌کنیم که هر مشتری تنها توسط یک توزیع‌کننده تامین می‌شود. در ضمن، تمامی تقاضاها تامین می‌شوند. در این مطالعه، شروط اساسی زنجیره تامین حلقه بسته به‌عنوان فرضیات مساله درنظرگرفته 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.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

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 درنظرگرفته می‌شود.

- نرخ‌های بهبود و دفع در مدل در نظرگرفته 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

دراین قسمت، چگونگی یکپارچه‌سازی میزان انتشار کربن با مدل پیشنهادی و متدولوژی محاسبه آن ارایه می‌شود. در زیر، مساله کمینه‌سازی هزینه انتشار معرفی می‌شود که درآن هزینه‌ای برای میزان انتشار درنظرگرفته 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 درنظر 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 €/(metric) 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 jامین توزیع‌کننده را نشان می‌دهند. در صورتی‌که $EM_total_DC_{jK}$ و $e_u_DC_{jk}$ به ترتیب میزان انتشار کربن و آن میزان اختصاص داده شده به هر واحد محصول از jامین توزیع‌کننده 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 jامین توزیع‌کننده را نشان می دهند.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

$EM_total_DD_{jm}$ و $e_u_DD_{jm}$ به ترتیب میزان انتشار کربن و آن میزان اختصاص داده شده به هر واحد محصول از j امین توزیع‌کننده به m امین جداساز را نشان می‌دهند. $EM_total_DM_{mi}$ و $e_u_DM_{mi}$ به ترتیب میزان انتشار کربن و آن میزان اختصاص داده شده به هر واحد محصول از m امین جداساز به i امین کارخانه را نشان می‌دهند.

به منظور فرمول‌بندی این مدل کمینه‌سازی هزینه انتشار به صورت ریاضی، تعریف پارامترها و متغیرهای زیرضروری است:

شاخص‌ها

I	مجموعه مکان‌های کاندیدای تولیدکننده
J	مجموعه مکان‌های کاندیدای توزیع‌کننده
K	مجموعه مشتریان
M	مجموعه مکان‌های کاندیدای جداساز
V	مجموعه انواع روش‌های حمل و نقل
V_I	مجموعه انواع روش‌های حمل و نقل در تولیدکننده $V_I \subset V$
V_J	مجموعه انواع روش‌های حمل و نقل در توزیع‌کننده $V_J \subset V$
V_M	مجموعه انواع روش‌های حمل و نقل در جداساز $V_M \subset V$

پارامترها

Cm_i	ظرفیت تولیدکننده i
Tc_j	ظرفیت کل توزیع‌کننده j (مستقیم و معکوس)
Cd_m	ظرفیت جداساز m
Pc_j	درصد ظرفیت کل برای لجستیک معکوس در توزیع‌کننده 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 تولیدکننده i
CMD_{v_i}	هزینه واحد حمل و نقل از تولیدکننده به توزیع‌کننده با وسیله‌نقلیه v_i در هرکیلومتر
CDC_{v_j}	هزینه واحد حمل و نقل از توزیع‌کننده به مشتری با وسیله‌نقلیه v_j در هرکیلومتر
CDM_{v_m}	هزینه واحد حمل و نقل از جداساز به تولیدکننده با وسیله‌نقلیه v_m در هرکیلومتر
FM_i	هزینه ثابت عملیات تولیدکننده i
FDC_j	هزینه ثابت عملیات در توزیع‌کننده j
FD_m	هزینه ثابت عملیات در جداساز m

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

Cl	هزینه ثابت دفع در هر واحد
dis_MD_{ij}	مسافت بین تولیدکننده i و توزیع‌کننده j
dis_DC_{jk}	مسافت بین توزیع کننده j و مشتری k
dis_CC_{kl}	مسافت بین مشتری k و مشتری l
dis_DD_{jm}	مسافت بین توزیع‌کننده j و جداساز m
dis_DM_{mi}	مسافت بین جداساز m و تولیدکننده i
$t_DC_{jkv_j}$	زمان حمل و نقل از توزیع‌کننده jبه مشتری k با استفاده از وسیله‌نقلیه v_j
$t_CC_{klv_j}$	زمان حمل و نقل از مشتری k به مشتری l با استفاده از وسیله‌نقلیه v_j
a_c_k	حد پایین زمان مورد انتظار تحویل محصول به مشتری k
b_c_k	حد بالای زمان مورد انتظار تحویل محصول به مشتری k
Rc_{kj}	هزینه بهبود در توزیع‌کننده jازمشتری k
NVM_{iv_i}	تعداد وسیله‌نقلیه v_iدر تولیدکننده i
NVD_{jv_j}	تعداد وسیله‌نقلیه v_jدر توزیع‌کننده j
$NVDi_{mv_m}$	تعداد وسیله‌نقلیه v_mدر جداساز m
CVM_{v_i}	ظرفیت وسیله‌نقلیه v_i
CVD_{v_j}	ظرفیت وسیله‌نقلیه v_j
$CVDi_{v_m}$	ظرفیت وسیله‌نقلیه v_m
$LO_{\max}_M_{v_i}$	ماکزیمم بار برای وسیله‌نقلیه v_i
$LO_{\max}_D_{v_j}$	ماکزیمم بار برای وسیله‌نقلیه v_j
$LO_{\max}_Di_{v_m}$	ماکزیمم بار برای وسیله‌نقلیه v_m
$LF_M_{v_i}$	ضریب بار متوسط برای وسیله‌نقلیه v_i
$LF_D_{v_j}$	ضریب بار متوسط برای وسیله‌نقلیه v_j
$LF_Di_{v_m}$	ضریب بار متوسط برای وسیله‌نقلیه v_m
vol	حجم محصول
ρ_{v_i}	چگالی محصول برای وسیله‌نقلیه v_i
wp	وزن محصول
$capw$	ظرفیت کل کشتی باری
Q	ماکزیمم تعداد گره که یک فروشنده می‌تواند ملاقات کند
L	می نیمم تعداد گره که یک فروشنده می‌تواند ملاقات کند
M	عدد بزرگ مثبت
CEF	ضریب ثابت انتشار

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

VEF	ضریب متغیر انتشار
$FC_D_{v_j}$	مصرف سوخت برای وسیله‌نقلیه v_j
$FE_D_{v_j}$	مصرف سوخت دیزل برای وسیله‌نقلیه v_j
FC_M	مصرف سوخت کامیون مستقر در کارخانه
FE_M	مصرف سوخت دیزل کامیون مستقر در کارخانه
FC_Di	مصرف سوخت کامیون مستقر در جداساز
FE_Di	مصرف سوخت دیزل کامیون مستقر در جداساز
T	ضریب مصرف سوخت برای قطار دیزلی
FER	میزان انتشارسوخت برای قطار دیزلی
W_gr	وزن ناخالص قطار
FEW	میزان انتشار سوخت برای کشتی
FCW	مصرف سوخت برای کشتی
CE	قیمت کربن منتشره (نشان داده شده با **€/(metric)tonne emissions**)

متغیرهای تصمیم

$x_MD_{ijv_i}$	اگر یک محصول توسط وسیله‌نقلیه v_i از تولیدکننده i به توزیع‌کننده j حمل شود عدد یک و در غیر این‌صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.
$x_DC_{jkv_j}$	اگر یک محصول توسط وسیله‌نقلیه v_j از توزیع‌کننده j به مشتری k حمل شود عدد یک و در غیر این‌صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.
$x_DD_{jmv_j}$	اگر یک محصول توسط وسیله‌نقلیه v_j از توزیع‌کننده j به جداساز m حمل شود عدد یک و در غیر این‌صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.
$x_CD_{kjv_j}$	اگر یک وسیله‌نقلیه v_j از مشتری k به توزیع‌کننده j برگردد عدد یک و در غیر این‌صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.
$x_DM_{miv_m}$	اگر یک محصول باز استفاده توسط وسیله‌نقلیه v_m از جداساز m به تولیدکننده i حمل شود عدد یک و در غیر این‌صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.
α_i	اگر تولید در تولیدکننده i اتفاق بیفتد عدد یک و در غیراین‌صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.
β_j	اگر توزیع‌کننده j فعال باشد عدد یک و در غیر این‌صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.
γ_m	اگر جداساز m فعال باشد عدد یک و در غیر این‌صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.
$z_CC_{klv_j}$	اگر یک محصول توسط وسیله‌نقلیه v_j از مشتری k به مشتری l حمل شود عدد یک و

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

در غیر این‌صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.

$y_MD_{ijv_i}$ میزان محصول حمل شده توسط وسیله‌نقلیه v_i از تولیدکننده i به توزیع‌کننده j

$y_DC_{jkv_j}$ میزان محصول حمل شده توسط وسیله‌نقلیه v_j از توزیع‌کننده j به مشتری k

$y_DD_{jmv_j}$ میزان محصول بهبود داده شده حمل شده توسط وسیله‌نقلیه v_j از توزیع‌کننده j به جداساز m

$y_CD_{kjv_j}$ میزان محصول بهبود داده شده حمل شده توسط وسیله‌نقلیه v_j از مشتری k به توزیع‌کننده j

$y_DM_{miv_m}$ میزان محصول باز استفاده شده توسط وسیله‌نقلیه v_m از جداساز m به تولیدکننده i

$y_CC_{klv_j}$ میزان محصول حمل شده توسط وسیله‌نقلیه v_j از مشتری k به مشتری l

PM_i میزان تولید در تولیدکننده i

u_k تعداد گره‌های ملاقات شده توسط فروشنده‌ها از توزیع‌کننده به گره مشتری k

$congR_k$ مقدار محصول جمع‌آوری شده در مشتری k

$congF_k$ مقدار محصول بهبود جمع‌آوری شده در مشتری k

S_k زمان ورود محصول در مشتری k

$EM_total_MD_{ij}$ میزان انتشار کلی وسیله‌نقلیه از کارخانه i به توزیع‌کننده j

$EM_total_DC_{jk}$ میزان انتشار کلی وسیله‌نقلیه از توزیع‌کننده j به مشتری k

$EM_total_CD_{kj}$ میزان انتشار کلی وسیله‌نقلیه از مشتری k به توزیع‌کننده j

$EM_total_CC_{kl}$ میزان انتشار کلی وسیله‌نقلیه از مشتری k به مشتری l

$EM_total_DD_{jm}$ میزان انتشار کلی وسیله‌نقلیه از توزیع‌کننده j به جداساز m

$EM_total_DM_{mi}$ میزان انتشار کلی وسیله‌نقلیه از جداساز m به کارخانه i

$e_u_MD_{ij}$ میزان انتشار واحد وسیله‌نقلیه از کارخانه i به توزیع‌کننده j

$e_u_DC_{jk}$ میزان انتشار واحد وسیله‌نقلیه از توزیع‌کننده j به مشتری k

$e_u_CD_{kj}$ میزان انتشار واحد وسیله‌نقلیه از مشتری k به توزیع‌کننده j

$e_u_CC_{kl}$ میزان انتشار واحد وسیله‌نقلیه از مشتری k به مشتری l

$e_u_DD_{jm}$ میزان انتشار واحد وسیله‌نقلیه از توزیع‌کننده j به جداساز m

$e_u_DM_{mi}$ میزان انتشار واحد وسیله‌نقلیه از جداساز m به کارخانه i

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

تابع هدف:

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

$$f = \sum_{i\in I}\alpha_i \cdot FM_i + \sum_{j\in J}\beta_j \cdot FDC_j + \sum_{m\in M}\gamma_m \cdot FD_m + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{v_i\in V_I} y_MD_{ijv_i}\cdot dis_MD_{ij}\cdot CMD_{v_i} \quad (1)$$
$$+\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{v_j\in V_J} y_DC_{jkv_j}\cdot dis_DC_{jk}\cdot CDC_{v_j} + \sum_{k\in K}\sum_{l\in K}\sum_{v_j\in V_J} y_CC_{klv_j}\cdot dis_CC_{kl}\cdot CDC_{v_j}$$
$$+\sum_{k\in K}\sum_{j\in J}\sum_{v_j\in V_J} y_CD_{kjv_j}\cdot dis_DC_{jk}\cdot CDC_{v_j} + \sum_{j\in J}\sum_{m\in M}\sum_{v_j\in V_J} y_DD_{jmv_j}\cdot dis_DD_{jm}\cdot CDC_{v_j}$$
$$+\sum_{m\in M}\sum_{i\in I}\sum_{v_m\in V_M} y_DM_{miv_m}\cdot dis_DM_{mi}\cdot CDM_{v_m} + \sum_{i\in I} PM_i\cdot P_cost_i +$$
$$\sum_{k\in K}\sum_{j\in J}\sum_{v_j\in V_J} y_CD_{kjv_j}\cdot Rc_{kj} + CL\cdot\sum_{m\in M}\left[Pl_m\cdot\sum_{j\in J}\sum_{v_j\in V_J} y_DD_{jmv_j}\right] +$$
$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} e_u_MD_{ij}\cdot CE + \sum_{j\in J}\sum_{k\in K} e_u_DC_{jk}\cdot CE + \sum_{k\in K}\sum_{l\in K} e_u_CC_{kl}\cdot CE$$
$$+\sum_{k\in K}\sum_{j\in J} e_u_CD_{kj}\cdot CE + \sum_{j\in J}\sum_{m\in M} e_u_DD_{jm}\cdot CE + \sum_{m\in M}\sum_{i\in I} e_u_DM_{mi}\cdot CE$$

محدودیت‌ها:

$$\sum_{i\in I}\alpha_i \geq 1, \quad (2)$$
$$\sum_{j\in J}\beta_j \geq 1, \quad (3)$$
$$PM_i \geq 1 - M(1-\alpha_i), \qquad \forall i\in I, \quad (4)$$
$$\sum_{v_i\in V_I}\sum_{j\in J} x_MD_{ijv_i} \geq 1 - M(1-\alpha_i), \qquad \forall i\in I, \quad (5)$$
$$\sum_{v_i\in V_I}\sum_{i\in I} x_MD_{ijv_i} \geq 1 - M(1-\beta_j), \qquad \forall j\in J, \quad (6)$$
$$y_MD_{ijv_i} \geq 1 - M(1 - x_MD_{ijv_i}) \qquad \forall i\in I,\ \forall j\in J,\ \forall v_i\in V_I, \quad (7)$$
$$\sum_{v_i\in V_I}\sum_{j\in J} y_MD_{ijv_i} \leq Cm_i, \qquad \forall i\in I, \quad (8)$$
$$\sum_{j\in J} x_MD_{ijv_i} \leq NVM_{iv_i} \qquad \forall i\in I,\ \forall v_i\in V_I, \quad (9)$$
$$\sum_{v_i\in V_I} x_MD_{ijv_i} \leq 1, \qquad \forall i\in I,\ \forall j\in J, \quad (10)$$
$$wp\cdot y_MD_{ijv_i} \leq CVM_{v_i}\cdot LF_M_{v_i}, \qquad \forall i\in I,\ \forall j\in J,\ \forall v_i\in V_I, \quad (11)$$
$$\sum_{v_j\in V_J}\sum_{k\in K} x_DC_{jkv_j} \geq 1 - M(1-\beta_j), \qquad \forall j\in J, \quad (12)$$
$$\sum_{v_j\in V_J}\sum_{k\in K} x_CD_{kjv_j} \geq 1 - M(1-\beta_j), \qquad \forall j\in J, \quad (13)$$
$$\sum_{v_j\in V_J}\sum_{j\in J} x_DC_{jkv_j} + \sum_{v_j\in V_J}\sum_{j\in J} x_CD_{kjv_j} \leq 1, \qquad \forall k\in K, \quad (14)$$
$$\sum_{v_j\in V_J}\sum_{j\in J} x_DC_{jkv_j} + \sum_{v_j\in V_J}\sum_{l\in k} z_CC_{lkv_j} = 1, \qquad \forall k\in K, \quad (15)$$
$$\sum_{v_j\in V_J}\sum_{j\in J} x_CD_{kjv_j} + \sum_{v_j\in V_J}\sum_{l\in k} z_CC_{klv_j} = 1, \qquad \forall k\in K, \quad (16)$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

$$\sum_{l\in K} z_CC_{klv_j} + \sum_{j\in J} x_CD_{kjv_j} = \sum_{e\in K} z_CC_{ekv_j} + \sum_{j\in J} x_DC_{jkv_j},\ \forall k\in K,\ \forall v_j\in V_J, \quad (۱۷)$$

$$u(k)-u(l)+\left(Q\cdot z_CC_{klv_j}\right)+\left((Q-۲)\cdot z_CC_{lkv_j}\right)\le Q-۱,\quad \forall k,l\in K,\ \forall v_j\in V_J, \quad (۱۸)$$

$$u(k)+\left((Q-۲)\cdot \sum_{v_j\in V_j}\sum_{j\in J} x_DC_{jkv_j}\right)-\sum_{v_j\in V_J}\sum_{j\in J} x_CD_{kjv_j}\le Q-۱,\qquad \forall k\in K, \quad (۱۹)$$

$$\sum_{v_j\in V_J}\sum_{j\in J} x_DC_{jkv_j}+\left((۲-L)\cdot \sum_{v_j\in V_J}\sum_{j\in J} x_CD_{kjv_j}\right)\ge ۲,\qquad \forall k\in K, \quad (۲۰)$$

$$congR_k=\left(\sum_{v_j\in V_J}\sum_{l\in k} z_CC_{klv_j}\cdot congR_l\right)+dc_k,\qquad \forall k\in K, \quad (۲۱)$$

$$y_DC_{jkv_j}\ge ۱-M\left(۱-x_DC_{jkv_j}\right),\quad \forall k\in K,\ \forall v_j\in V_J,\ \forall j\in J, \quad (۲۲)$$

$$y_DC_{jkv_j}\ge congR_k,\qquad \forall k\in K,\ \forall v_j\in V_J,\ \forall j\in J, \quad (۲۳)$$

$$wp\cdot y_DC_{jkv_j}\le CVD_{v_j}\cdot LF_D_{v_j},\qquad \forall k\in K,\ \forall v_j\in V_J,\ \forall j\in J, \quad (۲۴)$$

$$\sum_{k\in K} x_DC_{jkv_j}\le NVD_{jv_j},\qquad \forall v_j\in V_J,\ \forall j\in J, \quad (۲۵)$$

$$\sum_{v_i\in V_I}\sum_{i\in I} y_MD_{ijv_i}=\sum_{v_j\in V_J}\sum_{k\in K} y_DC_{jkv_j},\qquad \forall j\in J, \quad (۲۶)$$

$$congF_k=\left(\sum_{v_j\in V_J}\sum_{l\in k} z_CC_{lkv_j}\cdot congF_l\right)+\lceil pr_k.dc_k\rceil,\qquad \forall k\in K, \quad (۲۷)$$

$$y_CD_{kjv_j}\ge ۱-M\left(۱-x_CD_{kjv_j}\right),\quad \forall k\in K,\ \forall v_j\in V_J,\ \forall j\in J, \quad (۲۸)$$

$$y_CD_{kjv_j}\ge congF_k,\qquad \forall k\in K,\ \forall v_j\in V_J,\ \forall j\in J, \quad (۲۹)$$

$$y_CC_{klv_j}\ge\left(\sum_{j\in J} y_DC_{jkv_j}+\sum_{h\in K} y_CC_{hkv_j}\right)-\lceil(۱-pr_k)\cdot dc_k\rceil-M\left(۱-z_CC_{klv_j}\right),\quad \forall k,l\in K,\ \forall v_j\in V_J, \quad (۳۰)$$

$$\sum_{v_j\in V_J}\sum_{j\in J} x_DD_{jmv_j}\ge ۱-M\left(۱-\gamma_m\right),\qquad \forall m\in M, \quad (۳۱)$$

$$\sum_{v_j\in V_J} x_DD_{jmv_j}\le ۱,\qquad \forall j\in J,\ \forall m\in M, \quad (۳۲)$$

$$\sum_{v_j\in V_J}\sum_{m\in M} x_DD_{jmv_j}\ge ۱-M\left(۱-\beta_j\right),\qquad \forall j\in J, \quad (۳۳)$$

$$y_DD_{jmv_j}\ge ۱-M\left(۱-x_DD_{jmv_j}\right),\qquad \forall j\in J,\ \forall m\in M,\ \forall v_j\in V_J, \quad (۳۴)$$

$$\sum_{v_j\in V_J}\sum_{k\in K} y_CD_{kjv_j}=\sum_{v_j\in V_J}\sum_{m\in M} y_DD_{jmv_j},\qquad \forall j\in J, \quad (۳۵)$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{k \in K} y_DC_{jkv_j} + \sum_{v_j \in V_J} \sum_{m \in M} y_DD_{jmv_j} \le Tc_j \cdot \beta_j, \qquad \forall j \in J, \tag{۳۶}$$

$$\sum_{m \in M} x_DD_{jmv_j} \le NVD_{jv_j}, \qquad \forall j \in J, \ \forall v_j \in V_J, \tag{۳۷}$$

$$wp \cdot y_DD_{jmv_j} \le CVD_{v_j} \cdot LF_D_{v_j}, \quad \forall j \in J, \forall m \in M, \ \forall v_j \in V_J, \tag{۳۸}$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{m \in M} y_DD_{jmv_j} \le \left\lfloor Pc_j \cdot Tc_j \cdot \beta_j \right\rfloor, \qquad \forall j \in J, \tag{۳۹}$$

$$\sum_{v_m \in V_m} \sum_{i \in I} x_DM_{miv_m} \ge ۱ - M\left(۱ - \gamma_m\right), \qquad \forall m \in M, \tag{۴۰}$$

$$\sum_{v_m \in V_M} x_DM_{miv_m} \le ۱ \qquad \forall m \in M, \forall i \in I, \tag{۴۱}$$

$$\sum_{v_m \in V_m} \sum_{m \in M} x_DM_{miv_m} \ge ۱ - M\left(۱ - \alpha_i\right), \qquad \forall i \in I, \tag{۴۲}$$

$$y_DM_{miv_m} \ge ۱ - M\left(۱ - x_DM_{miv_m}\right), \qquad \forall m \in M, \forall i \in I, \forall v_m \in V_M, \tag{۴۳}$$

$$\sum_{v_m \in V_M} \sum_{m \in M} y_DM_{miv_m} + PM_i = \sum_{v_i \in V_i} \sum_{j \in J} y_MD_{ijv_i}, \qquad \forall i \in I, \tag{۴۴}$$

$$\sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} y_DD_{jmv_j} = \left\lfloor Pl_m \cdot \sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} y_DD_{jmv_j} \right\rfloor + \sum_{v_m \in V_M} \sum_{i \in I} y_DM_{miv_m}, \qquad \forall m \in M \tag{۴۵}$$

$$\sum_{v_m \in V_M} \sum_{i \in I} y_DM_{miv_m} + \left\lfloor Pl_m \cdot \sum_{v_j \in V_J} \sum_{j \in J} y_DD_{jmv_j} \right\rfloor \le \gamma_{\mathrm{m}} \cdot Cd_m, \qquad \forall m \in M, \tag{۴۶}$$

$$\sum_{i \in I} x_DM_{miv_m} \le NVDi_{mv_m}, \qquad \forall m \in M, \forall v_m \in V_M, \tag{۴۷}$$

$$wp \cdot y_DM_{miv_m} \le CVDi_{v_m} \cdot LF_Di_{v_m}, \qquad \forall m \in M, \forall i \in I, \forall v_m \in V_M, \tag{۴۸}$$

$$S_k \ge a_c_k, \qquad \forall k \in K, \tag{۴۹}$$

$$S_k \le b_c_k, \qquad \forall k \in K, \tag{۵۰}$$

$$S_k + t_CC_{klv_j} - M\left(۱ - z_CC_{klv_j}\right) \le S_l, \qquad \forall k, l \in K, \ \forall v_j \in V_J, \tag{۵۱}$$

$$S_k + t_CC_{klv_j} + M\left(۱ - z_CC_{klv_j}\right) \ge S_l, \qquad \forall k, l \in K, \ \forall v_j \in V_J, \tag{۵۲}$$

$$t_DC_{jkv_j} - M\left(۱ - x_DC_{jkv_j}\right) \le S_k, \qquad \forall k \in K, \ \forall v_j \in V_J, \ \forall j \in J, \tag{۵۳}$$

$$t_DC_{jkv_j} + M\left(۱ - x_DC_{jkv_j}\right) \ge S_k, \qquad \forall k \in K, \ \forall v_j \in V_J, \ \forall j \in J, \tag{۵۴}$$

$$EM_total_MD_{ij} \ge y_MD_{ija} \cdot \left(CEF + \left(VEF \cdot ۰.۸۰۱ dis_MD_{ij}\right)\right) - M\left(۱ - x_MD_{ija}\right) - M\left(x_MD_{ijr} + x_MD_{ijt} + x_MD_{ijw}\right), \ \forall i \in I, \ \forall j \in J, \tag{۵۵}$$

$$e_u_MD_{ij} \ge \left(\left(v \cdot \rho_a \cdot EM_total_MD_{ij}\right) \Big/ \left(LO_{\max}_M_a \cdot LF_M_a\right) \right) - M\left(۱ - x_MD_{ija}\right) - M\left(x_MD_{ijr} + x_MD_{ijt} + x_MD_{ijw}\right), \ \forall i \in I, \ \forall j \in J, \tag{۵۶}$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

$$EM_total_MD_{ij} \geq y_MD_{ijr} \cdot \left(FE_M \cdot FC_M \cdot \left(dis_MD_{ij}\right)\right) - M\left(1 - x_MD_{ijr}\right) - M\left(x_MD_{ija} + x_MD_{ijt} + x_MD_{ijw}\right), \forall i \in I,\ \forall j \in J, \quad (57)$$

$$e_u_MD_{ij} \geq \left(\left(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_MD_{ij}\right) \Big/ \left(LO_{\max}_M_r \cdot LF_M_r\right)\right) - M\left(1 - x_MD_{ijr}\right) - M\left(x_MD_{ija} + x_MD_{ijt} + x_MD_{ijw}\right), \forall i \in I,\ \forall j \in J, \quad (58)$$

$$EM_total_MD_{ij} \geq y_MD_{ijt} \cdot \left(10^{-3} \cdot \left(\xi_f \cdot T \cdot FER\right) \Big/ 10^{6}\left(\sqrt{W_gr} \cdot LF_M_t\right)\right) - M\left(1 - x_MD_{ijt}\right) - M\left(x_MD_{ija} + x_MD_{ijr} + x_MD_{ijw}\right), \forall i \in I,\ \forall j \in J, \quad (59)$$

$$e_u_MD_{ij} \geq \left(EM_total_MD_{ij} \cdot dis_MD_{ij} \cdot wp\right) - M\left(1 - x_MD_{ijt}\right) - M\left(x_MD_{ija} + x_MD_{ijr} + x_MD_{ijw}\right), \forall i \in I,\ \forall j \in J, \quad (60)$$

$$EM_total_MD_{ij} \geq y_MD_{ijw} \cdot \left(FCW \cdot FEW \cdot 1.2 dis_MD_{ij}\right) - M\left(1 - x_MD_{ijw}\right) - M\left(x_MD_{ija} + x_MD_{ijr} + x_MD_{ijt}\right), \forall i \in I,\ \forall j \in J, \quad (61)$$

$$e_u_MD_{ij} \geq \left(\left(wp \cdot EM_total_MD_{ij}\right) \Big/ \left(capw \cdot 1000\right)\right) - M\left(1 - x_MD_{ijw}\right) - M\left(x_MD_{ija} + x_MD_{ijr} + x_MD_{ijt}\right), \forall i \in I,\ \forall j \in J, \quad (62)$$

$$EM_total_DC_{jK} \geq y_DC_{jkv_j} \cdot \left(FE_D_{v_j} \cdot FC_D_{v_j} \cdot \left(dis_DC_{jk}\right)\right) - M\left(1 - x_DC_{jkv_j}\right),\quad \forall k \in K,\ \forall j \in J,\ \forall v_j \in V_J, \quad (63)$$

$$e_u_DC_{jk} \geq \left(\left(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_DC_{jk}\right) \Big/ \left(LO_{\max}_D_{v_j} \cdot LF_D_{v_j}\right)\right) - M\left(1 - x_DC_{jkv_j}\right),\ \forall k \in K,\ \forall j \in J,\ \forall v_j \in V_J, \quad (64)$$

$$EM_total_CC_{Kl} \geq y_CC_{klv_j} \cdot \left(FE_D_{v_j} \cdot FC_D_{v_j} \cdot \left(dis_CC_{kl}\right)\right) - M\left(1 - z_CC_{klv_j}\right),\qquad \forall k,l \in K,\ \forall v_j \in V_J, \quad (65)$$

$$e_u_CC_{kl} \geq \left(\left(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_CC_{kl}\right) \Big/ \left(LO_{\max}_D_{v_j} \cdot LF_D_{v_j}\right)\right) - M\left(1 - z_CC_{klv_j}\right),\ \forall k,l \in K,\ \forall v_j \in V_J, \quad (66)$$

$$EM_total_CD_{Kj} \geq y_CD_{kjv_j} \cdot \left(FE_D_{v_j} \cdot FC_D_{v_j} \cdot \left(dis_DC_{jk}\right)\right) - M\left(1 - x_CD_{kjv_j}\right),\qquad \forall k \in K,\ \forall j \in J,\ \forall v_j \in V_J, \quad (67)$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

$$e_u_CD_{kj} \geq \left(\left(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_CD_{kj}\right) \Big/ \left(LO_{\max}_D_{v_j} \cdot LF_D_{v_j}\right) \right) - M\left(1 - x_CD_{kjv_j}\right),\ \forall k \in K,\ \forall j \in J,\ \forall v_j \in V_J \quad (68)$$

$$EM_total_DD_{jm} \geq y_DD_{jmv_j} \cdot \left(FE_D_{v_j} \cdot FC_D_{v_j} \cdot \left(dis_DD_{jm}\right)\right) - M\left(1 - x_DD_{jmv_j}\right),\quad \forall m \in M,\ \forall j \in J,\ \forall v_j \in V_J, \quad (69)$$

$$e_u_DD_{jm} \geq \left(\left(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_DD_{jm}\right) \Big/ \left(LO_{\max}_D_{v_j} \cdot LF_D_{v_j}\right) \right) - M\left(1 - x_DD_{jmv_j}\right),\ \forall m \in M,\ \forall j \in J,\ \forall v_j \in V_J \quad (70)$$

$$EM_total_DM_{mi} \geq y_DM_{mir'} \cdot \left(FE_Di \cdot FC_Di \cdot \left(dis_DM_{mi}\right) \cdot 1.05\right) - M\left(1 - x_DM_{mir'}\right) - M\left(x_DM_{mit'}\right),\ \forall m \in M,\ \forall i \in I, \quad (71)$$

$$e_u_DM_{mi} \geq \left(\left(v \cdot \rho_r \cdot EM_total_DM_{mi}\right) \Big/ \left(LO_{\max}_Di_{r'} \cdot LF_Di_{r'}\right) \right) - M\left(1 - x_DM_{mir'}\right) - M\left(x_DM_{mit'}\right),\ \forall m \in M,\ \forall i \in I, \quad (72)$$

$$EM_total_DM_{mi} \geq y_DM_{mit'} \cdot \left(10^{-3} \cdot \left(\xi_h \cdot T \cdot FER\right) \Big/ 10^{6} \left(\sqrt{W_gr} \cdot LF_Di_{t'}\right) \right) - M\left(1 - x_DM_{mit'}\right) - M\left(x_DM_{mir'}\right), \forall m \in M,\ \forall i \in I, \quad (73)$$

$$e_u_DM_{mi} \geq \left(EM_total_DM_{mi} \cdot dis_DM_{mi} \cdot wp\right) - M\left(1 - x_DM_{mit'}\right) - M\left(x_DM_{mir'}\right),\quad \forall m \in M,\ \forall i \in I, \quad (74)$$

$$x_MD_{ijv_i}, x_DC_{jkv_j}, x_DD_{jmv_j}, x_CD_{kjv_j}, x_DM_{miv_m}, z_CC_{klv_j}, \alpha_i, \beta_j, \gamma_m \in \{0,1\},\quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k, l \in K, \forall m \in M, \forall v_i \in V_I, \forall v_j \in V_J, \forall v_m \in V_M \quad (75)$$

$$y_MD_{ijv_i}, y_DC_{jkv_j}, y_DD_{jmv_j}, y_CD_{kjv_j}, y_DM_{miv_m}, y_CC_{klv_j}, PM_i, u_k, congR_k, congF_k, S_k, EM_total_MD_{ij}, EM_total_DC_{jk}, EM_total_CD_{kj}, EM_total_CC_{kl}, EM_total_DD_{jm}, EM_total_DM_{mi}, e_u_MD_{ij}, e_u_DC_{jk}, e_u_CD_{kj}, e_u_CC_{kl}, e_u_DD_{jm}, e_u_DM_{mi} \geq 0,\ \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k, l \in K, \forall m \in M, \forall v_i \in V_I, \forall v_j \in V_J, \forall v_m \in V_M. \quad (76)$$

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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

یک توزیع‌کننده را می‌پوشاند. این مفهوم را محدودیت (۵) نشان می‌دهد. از طرفی، هر توزیع‌کننده حداقل یک لینک از کارخانه‌ها دریافت می‌کند پس از این‌که انتخاب شده باشد (محدودیت (۶)). محدودیت (۷) مقدار جریان محصول بین کارخانه و توزیع‌کننده را نشان می‌دهد. محدودیت (۸) ظرفیت کارخانه‌ها را در لجستیک مستقیم محدود می‌کند. محدودیت (۹) دلالت براین 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 توزیع‌کننده جلوگیری می‌کند. محدودیت ظرفیت هر وسیله نقلیه در حال سفر از کارخانه به سمت توزیع‌کننده توسط محدودیت (۱۱) نشان داده می‌شود. محدودیت (۱۲) ضمانت می‌کند که هر توزیع‌کننده فعال حداقل یک مشتری را می‌پوشاند. هر توزیع‌کننده فعال حداقل یک لینک از مشتریان دریافت می‌کند که این مطلب را محدودیت (۱۳) نشان می‌دهد. محدودیت (۱۴) نشان می‌دهد که یک فروشنده از توزیع‌کننده می‌بایست حداقل دو مشتری را ملاقات و تامین کند. محدودیت (۱۵) بیان می‌داردکه هر مشتری توسط یک توزیع‌کننده یا مشتری دیگر لینک می‌شود. همچنین یا به یک توزیع‌کننده 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 هرگونه 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 توزیع‌کننده و مشتری است. محدودیت (۲۳) برای تامین تقاضای مشتریان معرفی شده است. محدودیت ظرفیت هر وسیله نقلیه در حال سفر از توزیع‌کننده به مشتری توسط محدودیت (۲۴) نشان داده می‌شود. محدودیت (۲۵) دلالت دارد که تعداد وسیله‌های نقلیه در حال سفر از توزیع‌کننده 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 (۲۹-۲۸) میزان جریان بین مشتری و توزیع‌کننده 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 توزیع‌کنندگان دریافت می‌نماید. محدودیت (۳۲) از اختیار کردن بیش از یک وسیله بر مسیرانتخابی بین توزیع‌کننده و جداساز جلوگیری می‌کند. محدودیت (۳۳) براین موضوع دلالت دارد که هر توزیع‌کننده فعالی حداقل یک جداساز را می‌پوشاند. میزان جریان بین توزیع‌کننده 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 براین موضوع دارد که تعداد وسایل نقلیه در حال سفر از توزیع‌کننده 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 توزیع‌کنندگان 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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

کارخانه فعالی حداقل یک لینک از جداسازها دریافت می‌کند. میزان جریان بین جداساز و کارخانه توسط محدودیت‌های (۴۳) و (۴۴) نشان داده می‌شود. محدودیت (۴۵) قانون حفظ جریان را رعایت می‌کند. محدودیت (۴۶) محدودیت ظرفیت معکوس برای جداسازها را نشان می‌دهد. محدودیت (۴۷) دلالت براین 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 می‌شود. محدودیت‌های (۵۴-۴۹) پنجره زمانی رارعایت می‌کند. محدودیت‌های (۶۲-۵۵) میزان انتشار مختص به یک واحد محصول برای حمل و نقل از i امین کارخانه به jامین توزیع‌کننده را نشان می‌دهد. جایی‌که، $x_MD_{ija}...x_MD_{ijw}$ متغیرهای باینری هستند که محدودیت‌های انتشار کربن را به نوع روش حمل و نقل مربوط می‌سازند. محدودیت‌های (۵۶-۵۵)، (۵۸-۵۷)، (۶۰-۵۹) و (۶۲-۶۱) 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 جاده‌ای، حمل و نقل ریلی و حمل و نقل آبی را محاسبه می‌کنند.

محدودیت‌های (۶۳) و (۶۴) میزان انتشار اختصاص داده شده به هر واحد محصول برای حمل و نقل از j امین توزیع‌کننده به k امین مشتری را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (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 می‌دهد. محدودیت‌های (۶۷) و (۶۸) میزان انتشار اختصاص داده شده به هر واحد محصول برای حمل و نقل از k امین مشتری به jامین توزیع‌کننده را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۶۹) و (۷۰) میزان انتشار اختصاص داده شده به هر واحد محصول برای حمل و نقل از jامین توزیع‌کننده به m امین جداساز را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۷۰-۶۳) میزان انتشار کربن وسیله نقلیه مبتنی با روش‌شناسی NTM برای حمل و نقل جاده‌ای را محاسبه می‌کند. محدودیت‌های (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 می‌دهد. جایی‌که $x_DM_{mir'}$ و $x_DM_{mit'}$ متغیرهای تصمیمی هستند که محدودیت‌های میزان انتشار کربن را به نوع روش حمل و نقل مربوطه لینک می‌کنند. محدودیت‌های (۷۲-۷۱) و (۷۴-۷۳) میزان انتشار کربن وسیله نقلیه و قطار را مبتنی بر روش‌شناسی NTM برای حمل و نقل جاده‌ای و ریلی اندازه می‌گیرند. محدودیت (۷۵) متغیرهای باینری را نشان می‌دهد و محدودیت (۷۶) مابقی متغیرها را از پذیرفتن مقادیر منفی باز می‌دارد.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

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 به‌طوری‌که:

Equation (۲۱) →

$$congR_k \geq M \cdot \left(z_CC_{klv_j} - ۱\right) + \left(dc_k + congR_{\,l}\right), \quad \forall v_j \in V_J, \forall l, k \in K, \qquad (۷۷)$$

$$congR_k \leq (-M) \cdot \left(z_CC_{klv_j} - ۱\right) + \left(dc_k + congR_{\,l}\right), \quad \forall v_j \in V_J, \forall l, k \in K, \qquad (۷۸)$$

$$congR_k \leq \left(\sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in k} z_CC_{klv_j}\right) \cdot M + dc_k, \quad \forall k \in K, \qquad (۷۹)$$

$$congR_k \geq \left(\sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in k} z_CC_{klv_j}\right) \cdot (-M) + dc_k, \quad \forall k \in K, \qquad (۸۰)$$

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

Equation (۲۷) →

$$congF_k \geq M \cdot \left(z_CC_{klv_j} - ۱\right) + \left(\left(pr_k \cdot dc_k\right) + congF_{\,l}\right), \quad \forall v_j \in V_J, \forall l, k \in K, \qquad (۸۱)$$

$$congF_k \leq (-M) \cdot \left(z_CC_{klv_j} - ۱\right) + \left(\left(pr_k \cdot dc_k\right) + congF_{\,l}\right), \quad \forall v_j \in V_J, \forall l, k \in K, \qquad (۸۲)$$

$$congF_k \leq \left(\sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in k} z_CC_{klv_j}\right) \cdot M + \left(pr_k \cdot dc_k\right), \quad \forall k \in K, \qquad (۸۳)$$

$$congF_k \geq \left(\sum_{v_j \in V_J} \sum_{l \in k} z_CC_{klv_j}\right) \cdot (-M) + \left(pr_k \cdot dc_k\right), \quad \forall k \in K, \qquad (۸۴)$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

٤ مثال عددی

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 ارایه 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، توزیع‌کنندگان و جداسازها به ترتیب ۳، ۴ و ۲ در نظر گرفته می‌شود. کارخانجات، توزیع‌کنندگان 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 توزیع‌کنندگان، یک نوع روش حمل و نقل (جاده-ای) برای انتقال محصول از توزیع‌کنندگان به مشتریان و دو نوع روش حمل و نقل (ریلی و جاده‌ای) برای انتقال محصول از جداسازها به کارخانجات استفاده می‌شود.

ماکزیمم و می‌نیمم زمان انتظار برای مشتریان به ترتیب ۲۵۰۰ و ۵۰۰ واحد زمانی است. کارخانه، توزیع‌کننده، 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 توزیع‌کننده، 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/ می‌باشد. جدول ۳ خصوصیات وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. وزن و حجم محصول به ترتیب ۴۰ (kg) و ۵/ (m^3) است. ماکزیمم (Q) و می‌نیمم (L) تعداد مشتریانی که یک فروشنده می‌بایست ملاقات کند به ترتیب ۴و 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

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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

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

تولیدکننده	توزیع‌کننده			
	کشتی	قطار	کامیون	هواپیمای باری
	/۳	/۲	/۱۶	/۲۵
توزیع‌کننده	مشتری/جداساز			
	کامیون ۴۰ تنی		کامیون ۵ تنی	
	/۱۸		/۱۳	
جداساز	تولیدکننده			
	قطار		کامیون	
	/۲۵		/۱۵	

جدول ۳. خصوصیات وسایل نقلیه

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

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 به‌صورت شماتیکی نشان داده می‌شود. تابع هدف مدل در جدول ۴ ارایه می‌شود. نرخ‌های جریان محصول و مقدار گاز دی اکسید کربن منتشره به‌وسیله وسایل

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

نقلیه در مسیرهای منتخب نیز در همین جدول ۵ نشان داده می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز گفتیم در کل ۵ نوع لینک ارتباطی در شبکه وجود دارند که در ستون مسیرهای منتخب جدول مشاهده می‌شوند:

- لینک‌های ارتباطی میان کارخانجات و توزیع‌کننده‌ها توسط شمای $[n]$:a-b نشان داده می‌شود. a و b به ترتیب شماره کارخانه‌ها و توزیع‌کننده‌های فعال و منتخب را نشان می‌دهد. n شماره‌ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می‌شود. [ ] نماد مربوط به این نوع لینک‌های ارتباطی است.
- لینک‌های ارتباطی میان توزیع‌کننده‌ها و مشتریان توسط شمای (n) :c-d نشان داده می‌شود. c و d به ترتیب شماره توزیع‌کننده‌های فعال و منتخب و مشتریان را نشان می‌دهند و برعکس. n شماره‌ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می‌شود. ( ) نماد مربوط به این نوع لینک‌های ارتباطی است.
- لینک‌های ارتباطی مابین مشتریان توسط شمای $\{n\}$:e-f نشان داده می‌شود. e و f به ترتیب شماره مشتریان انتخاب شده را نشان می‌دهند. n شماره‌ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می‌شود. { } نماد مربوط به این نوع لینک‌های ارتباطی است.
- لینک‌های ارتباطی میان توزیع‌کننده‌ها و جداسازها توسط شمای $\langle n \rangle$:g-h نشان داده می‌شود. g و h به ترتیب شماره توزیع‌کننده‌ها و جداسازهای فعال و منتخب را نشان می‌دهند. n شماره‌ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می‌شود. ⟨ ⟩ نماد مربوط به این نوع لینک‌های ارتباطی است.

لینک‌های ارتباطی میان جداسازها و کارخانجات توسط شمای $\|n\|$:i-j نشان داده می‌شود که i و j به ترتیب شماره جداسازها و کارخانجات فعال و منتخب را نشان می‌دهند. n شماره‌ای است که بر روی مسیر منتخب در شکل درج می‌شود. ‖ ‖ نماد مربوط به این نوع لینک‌های ارتباطی است.

زنجیره حلقه بسته بهینه برای مدل پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده می‌شود. در این شکل، از رنگ‌های متنوعی برای مشخص کردن مسیر که در آن یک فروشنده از توزیع‌کننده منتخبی حرکت می‌کند و به مشتریان تحت پوشش می‌رسد استفاده می‌شود. بنابراین، مسیرهای انتخابی داده شده در جدول ۴ با رنگ‌های متنوعی نشان داده می‌شوند. تابع هدف برای مدل برابر ۲۳۳۷۶۵/۹ 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، توزیع‌کننده و جداساز و ۷ مشتری صرف می‌شود.

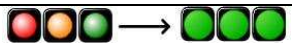
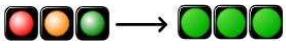
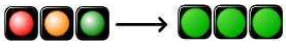
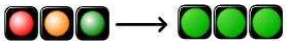
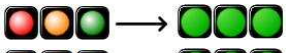
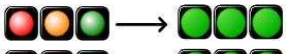
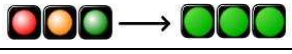
مسیرهای مناسب برای تحویل محصول به مشتریان از سمت کارخانجات و توزیع‌کنندگان در جریان‌های مستقیم، برای تحویل محصول بهبودی به جداسازها از سمت توزیع‌کنندگان و مشتریان و برای تحویل محصولات بازاستفاده برای کارخانجات از سمت جداسازها در جریان‌های معکوس برای مدل در شکل ۱ نمایان می‌شوند. همچنین، وسایل حمل و نقل انتخابی برای حمل محصول و میزان محصول مربوطه نیز در این شکل نشان داده می‌شود. میزان انتشار گاز دی اکسیدکربن (kg) توسط وسیله نقلیه انتخابی بر روی هر مسیر منتخب و میزان دفع نیز در این شکل قابل رویت می‌باشد. زمان تحویل محصول در هر مشتری برای مدل پیشنهادی در جدول ۵ ارایه می‌شود. 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.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

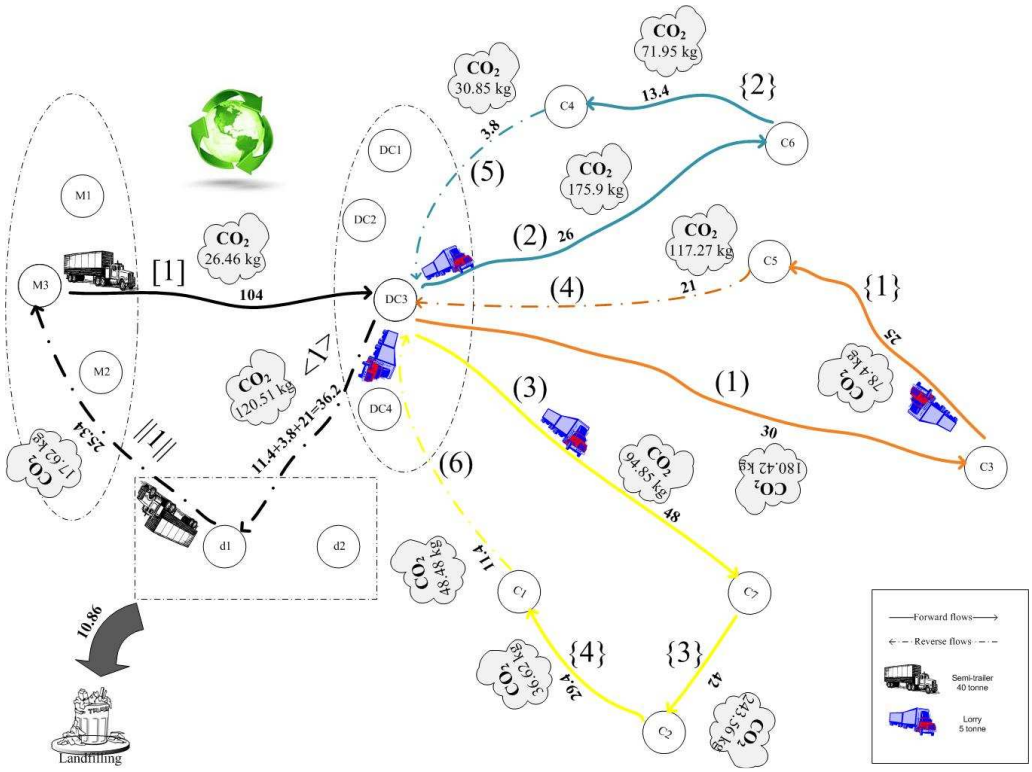
جدول ٤. نتایج حل مدل

میزان گاز دی اکسید کربن منتشره	مقدار محصول	مسیرهای منتخب
۲۶/۴۶	۱۰۴	۳-۳: $[1]$
۱۸۰/۴۲	۳۰	۳-۳: (۱)
۱۷۵/۹	۲۶	۶-۳: (۲)
۹۴/۸۵	۴۸	۷-۳: (۳)
۷۸/۴	۲۵	۵-۳: $\{1\}$
۷۱/۹۵	۱۳/۴	۴-۶: $\{2\}$
۲۴۳/۵۶	۴۲	۲-۷: $\{3\}$
۳۶/۶۲	۲۹/۴	۱-۲: $\{4\}$
۱۱۷/۲۷	۲۱	۳-۵: (۴)
۳۰/۸۵	۳/۸	۳-۴: (۵)
۴۸/۴۸	۱۱/۴	۳-۱: (۶)
۱۲۰/۵۱	۳۶/۲	۱-۳: $\langle 1 \rangle$
۱۷/۶۲	۲۵/۳۴	۱-۳: $\|\|1\|\|$
-	۱۰/۸۶	دفع
هدف		
۲۳۳۷۶۵/۹		

جدول ۵. پنجره زمانی

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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]



شکل ۱. زنجیره حلقه بسته بهینه مثال عددی

۵ نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته به منظور یکپارچه‌سازی سیستم لجستیک با مقوله زیست‌محیطی ارایه شد. زنجیره پیشنهادی ما شامل ۴ لایه (تولید کننده، توزیع کننده، مشتری و جداساز) می باشد. یافتن مکان‌های بهینه کارخانجات، توزیع کننده‌ها و جداسازها و توزیع بهینه محصول با رعایت پنجره زمانی، اهداف دنبال شده ما توسط برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته بودند. در این راه، از رویکرد چند توزیع کننده چند فروشنده دوره‌گرد (MDMTSP) میان لایه‌های توزیع کنندگان و مشتریان استفاده کردیم. به‌علاوه، برای مدیریت هر چه بهتر لجستیک معکوس به منظور کاهش اثرات منفی انتشارگازهای گلخانه‌ای، بر روی انتخاب نوع روش حمل و نقل به‌عنوان 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، هزینه‌ای را برای انتشار کربن مشخص می‌کرد. در نتیجه، مدل متعاقب با این قانون فرمول‌بندی شد. میزان توانایی و اثربخشی مدل پیشنهادی با مثال‌های 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.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]

[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 sup-ply 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.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-28]