

ارائه یک مدل بهینه‌سازی لجستیک معکوس جهت کاهش اثرات زیست‌محیطی مبتنی بر مدیریت ضایعات

مهتا کاکویی^۱، محمود مدیری^۲، قنبر عباسپور اسفدن^۳

چکیده:

امروزه افزایش جمعیت و رشد سریع شهرنشینی، افزایش سطح زندگی اجتماعی، تولید زباله‌های جامد را در جهان به میزان قابل توجهی تسریع کرده است. ضایعات جامد تبدیل به یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی در سطح جهان شده است؛ بنابراین، سیستم مدیریت ضایعات و لجستیک معکوس (RL) اخیراً به دلیل ترکیبی از عوامل محیطی، اقتصادی و اجتماعی مورد توجه قرار گرفته است؛ بنابراین برای جلوگیری از تخریب بیشتر محیط زیست ضروری است. مدیریت ضایعات شامل جمع‌آوری، انتقال، پاک‌سازی، بازیافت و دفع پسماندهاست. این پژوهش شامل یک شبکه لجستیک معکوس یازده سطحی و چند محصولی است که قابلیت حمایت از انواع صنایعی را دارد که محصولاتشان در دوران پایانی عمر خود قرار دارند. این تحقیق به طراحی شبکه لجستیک معکوسی پرداخته است که کلیه ضایعات را در یک محل جمع‌آوری و بر اساس نیاز کارخانه‌ها (از لحاظ جنس و ماهیت ضایعات و...) آن‌ها را تفکیک و به مقصد مورد نظر جهت بازیافت ارسال می‌کند. در این پژوهش مدل ریاضی مختلط جهت کاهش هزینه‌های کل سیستم ارائه شده است. تعداد مراکز تسهیلات، تعداد محصولات و قطعاتی که باید از یک مرکز به مرکز دیگر ارسال شوند، میزان انتشار CO₂ و هزینه کل مدل مشخص شده است. در نهایت، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مدل انجام شده و مدل با تغییر داده‌های ورودی در دو مورد مختلف مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. تحلیل‌های حساسیت بر روی پارامترهای مختلف برای نشان دادن قابلیت‌های

^۱ گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ دانشیار گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

M_modiri@azad.ac.ir

^۳ استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مدل پیشنهادی انجام می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که هزینه مجاز انتشار CO₂ تأثیر قابل توجهی بر مقدار تابع هدف دارد.

واژگان کلیدی: مدل، بهینه‌سازی لجستیک معکوس، اثرات زیست‌محیطی، مدیریت ضایعات
طبقه‌بندی موضوعی: Q53

۱- مقدمه

مدیریت ضایعات شامل جمع‌آوری، انتقال، پاک‌سازی، بازیافت و انهدام ضایعات هست. افزایش بازار رقابتی، پیشرفت سریع فناوری، افزایش جمعیت در طول چند سال گذشته و کاهش طول عمر محصول و افزایش نرخ بازگشت‌ها در طی سال‌های اخیر موجب شده بازیافت محصولات بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گیرد.

روش سنتی زنجیره تأمین اکنون به‌عنوان زنجیره تأمین روبه‌جلو (مستقیم) خوانده می‌شود که هیچ مسئولیتی را در قبال محصولاتی که در انتهای عمر خود قرار دارند (EOL) ندارد.

لجستیک، بخش فیزیکی زنجیره تأمین را در برمی‌گیرد و عمدتاً شامل کلیه فعالیت‌های مربوط به جریان مواد و کالاها از مرحله تهیه مواد خام تا تولید محصول نهایی از جمله حمل‌ونقل، انبارداری و غیره است. یکی از گرایش‌های جدید در مدیریت لجستیک، بازیافت، چرخه مجدد^۱ و یا استفاده مجدد از محصولات است. در این روش، محصولاتی که به پایان عمر مفیدشان می‌رسند، مجدداً از مصرف‌کننده نهایی خریداری می‌شوند و پس از مونتاژ، قسمت‌هایی از محصول که قابلیت استفاده مجدد را دارند، دوباره در قالب محصولات اسقاطی به چرخه حیات برمی‌گردند.

در سال‌های اخیر با توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی، تولیدکنندگان مجبور به عرضه محصولات سازگار با محیط‌زیست و همچنین تولیدکنندگان و مشتریان تشویق به احیا و بازیافت محصولات خراب و فرسوده شده‌اند.

¹ Recovery

² Recycling

احیاء باعث می‌شود تا مشتری فرصت استفاده و خرید محصولات را داشته باشد که پس از احیاء باقیمت پایین‌تر از محصولات نو اما تقریباً با همان استاندارد و کیفیت در اختیار او قرار می‌گیرد. در این تحقیق به چگونگی ارائه یک مدل بهینه‌سازی لجستیک معکوس جهت کاهش اثرات زیست‌محیطی مبتنی بر مدیریت ضایعات خواهیم پرداخت.

۱-۱- فرایندهای لجستیک معکوس

در لجستیک معکوس سیستم معمولاً شامل چهار گام جمع‌آوری، گزینش و انتخاب، مرتب‌سازی و طبقه‌بندی و توزیع به محل مناسب هست.

جمع‌آوری از طرق مختلف، شبیه به فعالیت‌های لجستیک روبه‌جلوی مربوط به خرید، تدارکات و غیره است. وجود مراکز جمع‌آوری این امکان را فراهم می‌سازد تا به‌وسیله بازرسی کیفی محصولات برگشتی باید به چه مرکزی برای احیاء، بازیافت یا انهدام ایمن حمل شود.

کالای برگشتی در مرحله بازرسی کیفی می‌تواند دارای حالت‌های مختلفی باشد که بر اساس آن مرتب‌سازی می‌شود:

۱. کالاهایی که با تعویض یا تعمیر دوباره، قطعه‌ای از آن قابل استفاده بوده و مجدداً توزیع می‌گردد (حالت احیاء).

۲. کالاها قابل استفاده نبوده، اما قطعاتی از آنها قابل استفاده است؛ بنابراین باید مونتاژ شده و قطعات قابل استفاده مجدداً گردند (حالت مونتاژ).

۳. کالاها یا قطعات غیرقابل استفاده مورد بازیافت قرار گرفته و به‌عنوان مواد اولیه به زنجیره مستقیم بازمی‌گردد (حالت بازیافت).

۴. کالا یا قطعاتی نه قابل احیاء و نه قابل بازیافت باشند (مانند مواد خطرزا) باید به‌گونه‌ای ایمن منهدم شود که از جمله می‌توان به دفن و سوزاندن اشاره کرد.

[\(Roger et al,1999\)](#)

۱-۲- عوامل اصلی استفاده شرکت‌ها از برنامه‌ریزی و اجرای لجستیک معکوس

عوامل اصلی به‌کارگیری برنامه‌ریزی و اجرای لجستیک معکوس توسط شرکت‌ها را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم نمود:

۱. عوامل اقتصادی
۲. قوانین و مقررات
۳. مسئولیت‌پذیری در قبال حساسیت‌های زیست‌محیطی

۳-۱- فاکتورهای زیست‌محیطی

بیشتر از برگ خریدهای زیست‌محیطی به‌عنوان عامل اصلی برای لجستیک معکوس یاد می‌شود. ([Herold et al, 2014](#))

عواملی چون عملکرد تعدیل و تنظیم، فشارهای بازار و مشتریان و همچنین انگیزه‌های اخلاقی، جملگی در بهبود عملکرد زیست‌محیطی مؤثرند. رولاگ که کنسرسیومی اروپایی برای تحقیق در زمینه لجستیک معکوس است، سه عامل اصلی را در بهبود پیوسته و اهمیت رو به رشد لجستیک معکوس در نظر گرفته است:

۱. اجبار شرکت‌ها در بازگرداندن محصولاتشان و ایجاد حساسیت بیشتر نسبت به مطالعات آینده بر اساس قوانین زیست‌محیطی.
۲. مزایای اقتصادی استفاده از محصولات بازگشت داده‌شده در فرایند تولید.
۳. آگاهی روزافزون مشتریان و مصرف‌کنندگان نسبت به محیط زیست ([Revlog , 2006](#))

دولت‌ها نیز هرچه بیشتر به وضع قوانین پرداخته‌اند که سازندگان را وادار نموده‌اند تا مسئولیت جمع‌آوری و دریافت محصولاتشان در انتهای عمر مفید محصول را بر عهده گیرند (مانند (WEEE))

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بیشتر ادبیات موجود در زمینه طراحی شبکه‌های لجستیک شامل مدل‌های مختلف مکان‌یابی تسهیلات بر پایه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته است. این مدل‌ها

¹Waste Electrical and Electronic Equipment

انواع مختلفی از مدل‌های ساده نظیر مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت نامحدود تا مدل‌های پیچیده‌تر نظیر مدل‌های چند رده‌ای با ظرفیت محدود و یا مدل‌های چند کالایی را شامل می‌شوند. همچنین، الگوریتم‌های قدرتمندی بر پایه تئوری بهینه‌سازی ترکیباتی برای حل این مدل‌ها ارائه گشته است.

[\(Pishvae,2012\)](#) یک مدل چندهدفه فازی برای مسئله زنجیر تأمین بازگشتی ارائه کردند که علاوه بر کمینه کردن هزینه، کمینه کردن آثار زیست‌محیطی را نیز به منزل هدف در نظر می‌گیرد. مدل مفروض تک‌محصولی است و بر اساس یک مثال موردی واقعی کارخانه سرنگ‌سازی کارایی خود را نشان می‌دهد. بخش قابل توجهی از آن در زمینه طراحی شبکه لجستیک پیشرواست و بخش اندکی به طراحی شبکه لجستیک معکوس باهدف بهینه‌سازی جریان معکوس از مشتریان به مراکز بازاریابی و دفع مناسب، تعیین تعداد مراکز جمع‌آوری، بازاریابی و دفع، مکان‌های آن‌ها و ظرفیت-هایشان می‌پردازد. لی و همکاران ([Lee et al,2016](#))، یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی دو هدف برای طراحی شبکه لجستیک معکوس مستقل پیشنهاد داده‌اند که هدف این مدل مدیریت هزینه‌های مستقیم و تأخیر در حمل‌ونقل در حد مطلوب است.

داس و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل برای مدیریت ضایعات ارائه دادند که مراکز جمع‌آوری و حمل‌ونقل را بهینه‌سازی می‌کند. تابع هدف کمینه کردن هزینه‌های جمع‌آوری و حمل‌ونقل سیستم ضایعات است. ([Giovan Lopez Ferri et al,2015](#)) مدلی را ارائه کردند که بر اساس این مدل معیارهای قانونی و زیست‌محیطی و اقتصادی در نظر گرفته شده است که هدف حداکثر کردن سود از طریق کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و فروش مواد قابل بازیافت بود.

لی و همکاران ([Lee et al,2016](#))، یک مدل MIP برای ضایعات شهری در هنگ‌کنگ ارائه دادند و سپس مدل را با سناریوهای مختلف حل کردند. مدل آن‌ها تعداد نقاط بهینه تسهیلات و ظرفیت کوره‌های انهدام را مشخص می‌کند. سان و همکاران ([Sun et al,2016](#)) مدلی را برای مراکز جمع‌آوری ضایعات جامد شهری ارائه دادند که مسیر بین ایستگاه‌های انتقال و سایت‌ها را بهینه‌سازی می‌کرد. تابع هدف

در جهت حداکثرسازی مقدار جمع‌آوری ضایعات بود. در این مدل مسیریابی وسایل نقلیه و ایستگاه‌های انتقال چندگانه موردبررسی قرار گرفت و کاربرد این مدل برای شهر دانگ ویتنام بررسی شد.

برای رفع نیازهای جامعه، منابع طبیعی به محصولات فرآوری شده تبدیل می‌شوند که پس از پایان عمر مفید خود دور ریخته می‌شوند. به عبارت دیگر، این منابع به اهدافی که برای آن ایجاد شده‌اند، می‌رسند و چیزی را تولید می‌کنند که پسماند جامد نامیده می‌شود. افزایش روزافزون دفع این مواد در محیط‌زیست به دلیل رشد نامنظم جمعیت و درآمد سرانه، مربوط به فرآیند تولید و مصرف ناکافی است که منجر به وخامت محیط طبیعی می‌شود ([Abu Hajar et al, 2020](#)).

([kilic et al , 2015](#)) یک سیستم لجستیک معکوس بهینه‌سازی شده برای مدیریت ضایعات محصولات الکتریکی و الکترونیکی ارائه کردند. ([Darbari et al, 2017](#)) یک مدل شبکه لجستیک معکوس برای محصولات برگشتی الکترونیکی ارائه کرد که بر به حداقل رساندن هزینه لجستیک معکوس و به حداکثر رساندن پایداری عملکرد تسهیلات بازیابی تمرکز دارد.

زر بخش نیاو همکاران ([Zarbakhshnia et al , 2019](#))، یک مدل لجستیک روبه‌جلو و معکوس برای لوازم‌خانگی ارائه کرد که هر دو جنبه اقتصادی و زیست‌محیطی را در نظر می‌گیرد. یو و همکاران ([Yu et al , 2020](#))، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تصادفی جدید را برای کاهش در معرض خطر جمعیت قرار گرفتن و حفظ کارایی حمل‌ونقل پرهزینه و تصفیه زباله‌های خطرناک پیشنهاد کرد.

همایونی و پیشوایی ([Homayouni and Pishvae, 2020](#))، شبکه جمع‌آوری و دفع زباله‌های بیمارستانی را در شرایط عدم اطمینان طراحی کردند که در تحقیقشان هدف به حداقل رساندن هزینه کل حمل‌ونقل و هزینه‌های عملیات و ریسک کل حمل‌ونقل و عملیات بود.

یا نیک و همکاران (Jaunich et al, 2020) چارچوبی جامع برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های مدیریت ضایعات الکترونیکی و شبکه زنجیره تأمین آن‌ها تحت دو سناریو فروش مجدد و بازیافت بر اساس هزینه انرژی، دستمزد کارکنان و هزینه‌های توسعه تسهیلات ارائه کرد.

در محاسبه کل اثرات زیست‌محیطی، محققان مؤذنی و همکاران (Moazzeni et al, 2022) از داده‌های مطالعات تجزیه و تحلیل چرخه حیات موجود استفاده می‌کنند، اما برخی اطلاعات کلیدی، مانند نیازهای انرژی در مرحله بازسازی، وجود ندارد. از مدل و به جای آن از برآوردهای موقت استفاده می‌شود.

لی و همکاران (Lee et al, 2022) یک مدل مکان - تخصیص برای تعیین تعداد و مکان کارخانه‌های دفع زباله در چین ایجاد کردند. درحالی‌که پری را و همکاران (Pereira Bautista, 2019) بر انتخاب مکان نقاط جمع‌آوری زباله شهری در بارسلون تمرکز کردند. کنان و همکاران (Kanan et al, 2010) توسعه یک مدل الگوریتم ژنتیک (GA) را برای بازیافت باتری‌های مصرف‌شده ارائه کرد.

غریبی و عبدالله‌زاده (Gharibi and Abdollahzadeh, 2021) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) را برای به حداکثر رساندن سود شبکه لجستیک معکوس توسعه دادند و موردی از بازسازی تلفن‌های همراه و دوربین‌های دیجیتال ارائه کردند.

یک مدل MILP جدید برای به حداقل رساندن هزینه‌های کل و خطر جمعیت برای طراحی شبکه مدیریت زباله‌های پزشکی در طول شیوع کووید-۱۹ توسط گویندان و همکارانش (Govindan et al, 2021) فرموله شد. آن‌ها یک رویکرد برنامه‌ریزی هدف‌فازی را برای حل مدل دوهدفه خود به کار گرفتند.

برای طراحی یک زنجیره تأمین معکوس برای مدیریت پسماندهای پزشکی، یک مدل MILP توسط کارگر و همکاران (Karegar et al, 2020) فرموله شد. هدف از مدل آن‌ها به حداقل رساندن کل هزینه‌ها، انتخاب بهترین فناوری تصفیه و به حداقل رساندن کل زباله‌های پزشکی ذخیره‌شده بود. آن‌ها یک رویکرد برنامه‌ریزی هدف

فازی را برای حل مدل چند هدفه خود به کار گرفتند. اوتانی و همکاران ([Ottounet](#))
 ([al,2020](#)) بهترین گزینه مدیریت زباله الکترونیکی (E-WM) را که با استفاده از این
 معیارها و شاخص‌ها تعیین می‌شود، تعیین کرد. زباله‌های الکترونیکی (e-waste) یا
 (WEEE) یک مقوله حیاتی در مدیریت پسماند است. یافته‌ها جایگزینی برای تحلیل
 دقیق‌تر برای طراحی شبکه شهری پایدار، مانند تولید ناخالص داخلی (GDP) و
 شاخص توسعه انسانی شهری، پیشنهاد می‌کنند.

هاشمی ([Hashemi, 2021](#))، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی [FUM] را
 توضیح داد. توابع هدف این مدل شامل به حداقل رساندن مجموع نسبت تقاضای
 برآورده نشده مشتریان به کل تقاضای آن‌ها در طول زمان، برای پوشش تمام جنبه‌های
 هزینه‌های این سیستم، مانند ساخت تأسیسات، خرید سوخت و ایجاد آسیب زیست
 محیطی از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای است. گازهای آلاینده افزایش زباله‌های
 الکترونیکی همچنین علاقه محققان را به سمت کاهش مصرف کربن و انتشار گازهای
 گلخانه‌ای سوق داده است که می‌تواند به کاهش گرمایش جهانی کمک کند ([Xiao](#))
 ([et al, 2019](#)). انتشار کربن از حمل و نقل حدود ۲۵ درصد از کل انتشار دی‌اکسید
 کربن را تشکیل می‌دهد ([Nanaki et al, 2016](#)). هنگام در نظر گرفتن نیاز به استفاده
 مجدد، بازیافت و عملیات بازیافت، باید دیدگاه اجتماعی را نیز در زمینه ایجاد شغل
 در نظر گرفت. با این حال، نرخ بیکاری در سطح جهانی ۵ درصد بود که می‌تواند در
 آینده به دلیل افزایش تعداد مشاغل ایجاد شده در سراسر جهان کاهش یابد ([Kühn,](#))
 ([2019](#)). این نشان می‌دهد که افزایش اجرای عملیات استفاده مجدد، بازیافت و بازیابی
 نه تنها حفظ منابع را بهبود می‌بخشد، بلکه منجر به افزایش اشتغال‌زایی و کاهش نرخ
 بیکاری می‌شود.

جدول ۱: بررسی ادبیات برای طراحی شبکه لجستیک معکوس

نویسنده	موضوع	تسهیلات و مطالعه موردی
پیشوایی و همکاران (Pishvae et al 2010)	طراحی شبکه لجستیک معکوس	تک کالایی و چندسطحی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

زنجیره عرضه مستقیم و معکوس	طراحی شبکه لجستیک معکوس	آل سید و همکاران (El-Sayed 2008)
مدل حلقه بسته چندمحصولی و چند دوره‌ای را برای صنعت بازیافت باتری خودرو حل با الگوریتم ژنتیک	طراحی شبکه لجستیک معکوس	کانان و همکاران (Kannan et al 2010)
لجستیک معکوس چندهدفه، چندمحصولی، چند دوره‌ای	طراحی شبکه لجستیک معکوس	فونسکا و همکاران (Foneska et al 2010)
زنجیره عرضه مستقیم چندمحصولی ویژگی این مدل یکسان نبودن مساحت مکان‌های بالقوه استقرار	کاهش اثرات زیست‌محیطی	عبدالله و همکاران (Abdollah et al 2011)
مدل MIP در جهت کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی	کاهش اثرات زیست‌محیطی	فان ونگ و همکاران (Fan wang et al 2011)
مکان‌یابی مرکز توزیع یک مدل چندهدفه حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی میزان انتشار کربن ناشی از حمل‌ونقل	کاهش اثرات زیست‌محیطی	لی و همکاران (Lee et al 2008)
مدل MIP برای ضایعات شهری در هنگ‌کنگ	مدیریت ضایعات شهری	لی و همکاران (۲۰۱۶)
مدلی برای مراکز جمع‌آوری ضایعات جامد شهری هدف در جهت حداکثرسازی مقدار جمع‌آوری ضایعات	مدیریت ضایعات شهری	سان و همکاران (sun et al 2016)
مدلی برای مدیریت ضایعات تابع هدف کمینه‌کردن هزینه‌های جمع‌آوری و حمل‌ونقل سیستم ضایعات	مدیریت ضایعات شهری	(Das et al 2015) داس و همکاران
هدف حداکثرکردن سود از طریق کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و فروش مواد قابل‌بازیافت در برزیل	مدیریت ضایعات شهری	گیوان لویز فری و همکاران (Giovan Lopez Ferri et al, 2015)

پس از تجزیه و تحلیل ادبیات موجود مرتبط با لجستیک معکوس مدیریت پسماند، مدل پیشنهادی از لجستیک معکوس و مدیریت پسماند برای کاهش اثرات زیست‌محیطی استفاده کرده است. در مدل پیشنهادی، محصولاتی که در پایان عمر خود هستند یا محصولاتی که دیگر قابل استفاده نیستند جمع‌آوری شده و به چرخه عمر

خود بازگردانده می‌شوند و یا قطعات آن‌ها مجدداً استفاده می‌شوند. اگر قابل استفاده نباشند، با خیال راحت از بین می‌روند تا کمترین تأثیر را بر محیط‌زیست داشته باشند. درنهایت در مدل ارائه‌شده کاهش هزینه‌ها در هر یک از تسهیلات (برای فعالیت‌های مختلف از جمله حمل‌ونقل، محیط‌زیست، ساخت تسهیلات، گاراتی و عملیات) هدف اصلی بود. باتوجه‌به مطالعات انجام‌شده، مدلی با مفروضات ارائه‌شده وجود ندارد که کل شبکه لجستیک معکوس و هزینه‌های زیست‌محیطی را به طور هم‌زمان کاهش دهد؛ بنابراین، در این تحقیق هزینه‌های زیست‌محیطی با شبکه لجستیک معکوس باهم در نظر گرفته‌شده و مدل با استفاده از مثال‌های عددی حل شده است.

۳- روش‌شناسی

این بخش شرح دقیق شکل و مفروضات شبکه لجستیک معکوس طراحی شده را ارائه می‌دهد. تعریف مسئله طراحی شبکه لجستیک معکوس برای مدیریت زباله الکترونیکی در شکل ۱ نشان داده‌شده است.

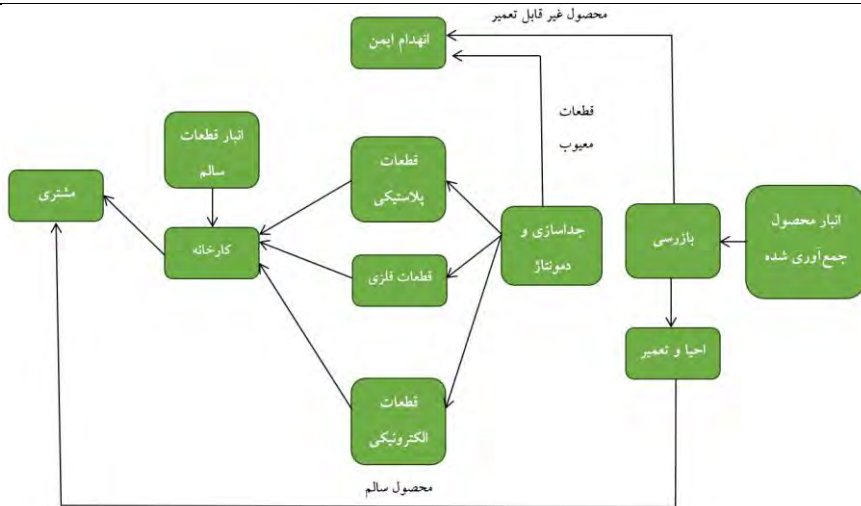
شکل ۱: طراحی شبکه لجستیک معکوس برای مدیریت ضایعات الکترونیکی



۳-۱- شبکه موردبررسی در این تحقیق:

۱. یک شبکه چندمحصولی و یازده سطحی است.
۲. موقعیت مرکز جمع‌آوری و مشتریان مشخص است.

۳. کیفیت محصولات برگشتی مشخص نمی‌باشد.
 ۴. کیفیت محصولات بازیافت شده و محصولات جدید در یک سطح نمی‌باشد.
 ۵. تسهیلات شامل مراکز (جمع‌آوری، بازرسی، کنترل، جداسازی و دمونتاز، احیاء، انبار قطعات سالم (قطعه ساز)، کارخانه تولیدکننده، مشتری، مرکز جمع‌آوری قطعات پلاستیکی، مرکز جمع‌آوری قطعات فلزی، مرکز جمع‌آوری قطعات الکترونیکی و انهدام ایمن) می‌باشد.
 ۶. هزینه‌های شبکه شامل (هزینه احداث تسهیلات، هزینه حمل‌ونقل بین تسهیلات و هزینه عملیات در هر تسهیلات و هزینه‌های اثرات زیست‌محیطی در احداث، پردازش تسهیلات و حمل‌ونقل) می‌باشد.
 ۷. هزینه و مقدار انتشار گاز CO_2 ناشی از حمل‌ونقل و احداث و عملیات در تسهیلات مشخص و قطعی می‌باشد.
 ۸. هزینه گارانتی برای محصولات ثابت فرض می‌شود.
- طراحی شبکه به گونه‌ای است که محصولاتی که خراب شده‌اند یا در پایان عمر خود قرار دارند و... در مرکز جمع‌آوری، گردآوری می‌شوند تا از آنجا به مرکز بازرسی جهت کنترل فرستاده شود. در این مرکز محصولاتی که قابل احیا باشند (تعمیر یا تعویض قطعه‌ای دوباره قابل استفاده می‌شوند) به مرکز احیا و تعمیر و اگر محصول قابل تعمیر نباشد و تنها قطعاتی از آن قابل استفاده باشند، به مرکز جداسازی و دمونتاز فرستاده می‌شود. اگر قطعات اصلاً قابل استفاده نباشد، به مرکز انهدام ایمن برای منهدم کردن فرستاده می‌شود. در قسمت جداسازی و دمونتاز قطعات قابل استفاده جدا شده و به مراکز قطعات الکترونیکی و قطعات فلزی و قطعات پلاستیکی فرستاده می‌شود. سپس به مرکز کارخانه می‌رود و سپس به مرکز کارخانه فرستاده می‌شود تا این مرکز با استفاده از این قطعات و قطعات ساخته شده در مرکز قطعه سالم محصولی در حد کیفیت محصول اولیه تولید کند. اگر هم قطعات قابل استفاده نباشند باز هم برای منهدم کردن به مرکز انهدام ایمن فرستاده می‌شوند و مراکز مشتری هم همیشه برای خرید محصولات متقاضی هستند.



شکل ۲: شکل شبکه تحقیق

جدول ۲: مجموعه‌ها

I	مجموعه تمام نقاط مراکز انبار جمع‌آوری محصول	$I \in I$
J	مجموعه تمام نقاط بازرسی و کنترل	$j \in J$
K	مجموعه تمام نقاط جداسازی و دمونتاژ	$k \in K$
L	مجموعه تمام نقاط احیا و تعمیر	$l \in L$
P	مجموعه تمام نقاط قطعات پلاستیکی	$p \in P$
M	مجموعه تمام نقاط قطعات فلزی	$m \in M$
E	مجموعه تمام نقاط قطعات الکترونیکی	$e \in E$
N	مجموعه تمام نقاط انهدام ایمن	$n \in N$
F	مجموعه تمام نقاط کارخانه	$f \in F$
O	مجموعه تمام نقاط انبار قطعات سالم	$o \in O$
Y	مجموعه تمام نقاط مراکز مشتری	$y \in Y$
H	مجموعه تمام محصولات	$p \in P$
S	مجموعه تمام قطعات	$s \in S$

جدول ۳: اندیس‌ها

I	اندیس مرکز انبار محصول جمع‌آوری شده	$I \in I$
J	اندیس مرکز بازرسی و کنترل	$j \in J$
K	اندیس مرکز جداسازی و مونتاژ	$k \in K$
L	اندیس مرکز احیا و تعمیر	$l \in L$
P	اندیس قطعات پلاستیکی	$p \in P$
M	اندیس قطعات فلزی	$m \in M$
E	اندیس قطعات الکترونیکی	$e \in E$
N	اندیس مرکز انهدام ایمن	$n \in N$
F	اندیس کارخانه	$f \in F$
O	اندیس قطعات سالم	$o \in O$
Y	اندیس مشتری	$y \in Y$
H	اندیس محصول	$p \in P$
S	اندیس قطعه	$s \in S$
PP	اندیس قطعات پلاستیکی	$pp \in PP$
Mp	اندیس قطعات فلزی	$mp \in MP$
EP	اندیس قطعات الکترونیکی	$ep \in EP$

جدول ۴: پارامترها

f_i	هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری
g_j	هزینه ثابت احداث مرکز بازرسی
bs_k	هزینه ثابت احداث مرکز جداسازی و دمونتاز
bo_l	هزینه ثابت احداث مرکز احیا
So_p	هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری قطعات پلاستیکی
So_m	هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری قطعات فلزی
So_e	هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری قطعات الکترونیکی

b_n	هزینه ثابت احداث مرکز انهدام ایمن
d_f	هزینه ثابت احداث مرکز کارخانه تولیدکننده
a_o	هزینه ثابت احداث مرکز انبار قطعات سالم
e_y	هزینه ثابت احداث مرکز مشتری
gu_h	هزینه گارانتی محصول
Ic_i	حداکثر میزان دریافت در مرکز جمع‌آوری
Jc_j	حداکثر میزان دریافت در مرکز بازرسی و کنترل
Kc_k	حداکثر میزان دریافت در مرکز جداسازی و دمونتاز
Lc_l	حداکثر میزان دریافت در مرکز احیا و تعمیر
Pc_p	حداکثر میزان دریافت در مرکز قطعات پلاستیکی
Mc_m	حداکثر میزان دریافت در مرکز قطعات فلزی
Ec_e	حداکثر میزان دریافت در مرکز قطعات الکترونیکی
Nc_n	حداکثر میزان دریافت در مرکز انهدام ایمن
Fc_f	حداکثر میزان دریافت در مرکز کارخانه
Oc_o	حداکثر میزان دریافت در مرکز قطعات سالم
Yc_y	حداکثر میزان دریافت در مرکز مشتری
Io_i	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد جمع‌آوری
Jo_j	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد بازرسی و کنترل
Ko_k	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد جداسازی و دمونتاز
Lo_l	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد احیا و تعمیر
Po_p	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد قطعات پلاستیکی
Mo_m	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد قطعات فلزی
Eo_e	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد قطعات الکترونیکی
No_n	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد انهدام ایمن
Fo_f	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد کارخانه
Oo_o	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد انبار قطعات سالم
Yo_y	کلیه هزینه‌های عملیات در واحد مشتری
B_h	قیمت محصول تعمیر شده
S_h	قیمت محصول تولیدشده

L_h	درصدی از محصول که قابل احیاست
K_h	درصد محصول قابل استفاده
N_h	درصد محصول غیرقابل استفاده
O_s	درصد قطعات قابل استفاده
N_s	درصد قطعات غیرقابل استفاده
R_h	مقدار محصولات بازگشتی
CO_2^{cap}	مقدار مجاز انتشار CO_2 در شبکه لجستیک معکوس
α	هزینه ثابت انتشار بیش از حد مجاز CO_2 برحسب ریال به ازای هر تن انتشار
E	فاکتور انتشار CO_2 در حمل و نقل برحسب تن بر مایل
d_{ij}	فاصله بین واحد جمع‌آوری i و واحد بازرسی j
d_{jn}	فاصله بین واحد بازرسی j و واحد انهدام ایمن n
d_{jl}	فاصله بین واحد بازرسی j و واحد احیا و تعمیر l
d_{jk}	فاصله بین واحد بازرسی j و واحد جداسازی و دمونتاز k
d_{kn}	فاصله بین واحد جداسازی k و واحد انهدام ایمن n
d_{kp}	فاصله بین واحد جداسازی و دمونتاز k و واحد قطعات پلاستیکی p
d_{km}	فاصله بین واحد جداسازی و دمونتاز k و واحد قطعات فلزی m
d_{ke}	فاصله بین واحد جداسازی و دمونتاز k و واحد قطعات الکترونیکی e
d_{pf}	فاصله بین واحد قطعات پلاستیکی p و واحد کارخانه f
d_{mf}	فاصله بین واحد قطعات فلزی m و واحد کارخانه f
d_{ef}	فاصله بین واحد قطعات الکترونیکی e و واحد کارخانه f
d_{of}	فاصله بین واحد قطعات جدید O و کارخانه f
d_{fy}	فاصله بین واحد کارخانه f و واحد مشتری y
d_{ly}	فاصله بین واحد احیا و تعمیر l و واحد مشتری y
P_{ijh}	هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز جمع‌آوری به مرکز بازرسی و کنترل

I_{jlh}	هزینه حمل یک واحد محصول h از واحد بازرسی j به مرکز احیا و تعمیر l
D_{jkh}	هزینه حمل هر واحد محصول h از واحد بازرسی و کنترل j به مرکز جداسازی k
T_{kns}	هزینه حمل هر واحد قطعه s از مرکز جداسازی k به مرکز انهدام ایمن n
N_{jnh}	هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز جمع‌آوری به مرکز انهدام ایمن
A_{kps}	هزینه حمل هر واحد قطعه s از مرکز جداسازی k به مرکز قطعات پلاستیکی p
F_{lyh}	هزینه حمل هر واحد محصول h از واحد احیا و تعمیر l به مرکز مشتری y
K_{pfs}	هزینه حمل هر واحد قطعه s از مرکز قطعات پلاستیکی p به مرکز کارخانه f
L_{mfs}	هزینه حمل هر واحد قطعه s از مرکز قطعات فلزی m به مرکز کارخانه f
O_{efs}	هزینه حمل هر واحد قطعه s از مرکز قطعات الکترونیکی e به مرکز کارخانه f
E_{fyh}	هزینه حمل هر واحد قطعه s از مرکز کارخانه f به مرکز مشتری y
B_{kms}	هزینه حمل هر واحد قطعه s از واحد جداسازی k به واحد قطعات فلزی m
C_{kes}	هزینه حمل هر واحد قطعه s از مرکز جداسازی k به مرکز قطعات الکترونیکی e
H_{ofs}	هزینه حمل هر واحد قطعه s از مرکز قطعات سالم o به مرکز کارخانه f
K_{hs}	درصدی از محصول h که قطعات آن قابل استفاده است
D_{yh}	مقدار تقاضای واحد مشتری y از محصول h
h_s	محصولاتی که در آن‌ها قطعه S به کار رفته است

lb_{ih}	حد پایین پنجره زمانی برای جمع‌آوری محصول در مرکز جمع‌آوری i
ub_{ih}	حد بالای پنجره زمانی برای جمع‌آوری محصول در مرکز جمع‌آوری i

جدول ۵: متغیرهای تصمیم

X_{ijh}	مقدار محصول h که از مرکز I به مرکز J فرستاده می‌شود.
U_{jlh}	مقدار محصول h که از مرکز بازرسی J به مرکز احیا و تعمیر I فرستاده می‌شود.
W_{jnh}	مقدار محصول h که از مرکز بازرسی J به مرکز انهدام ایمن n فرستاده می‌شود.
B_{jkh}	مقدار محصول h که از مرکز بازرسی و کنترل J به مرکز جداسازی و دمونتاژ k فرستاده می‌شود
C_{kns}	مقدار قطعه s که از مرکز جداسازی و دمونتاژ k به مرکز انهدام ایمن n فرستاده می‌شود
V_{kppp}	مقدار قطعه s که از مرکز جداسازی و دمونتاژ k به مرکز قطعات پلاستیکی p فرستاده می‌شود
M_{kms}	مقدار قطعه s که از مرکز جداسازی و دمونتاژ k به مرکز قطعات فلزی m فرستاده می‌شود.
N_{kes}	مقدار قطعه s که از مرکز جداسازی و دمونتاژ k به مرکز قطعات الکترونیکی e فرستاده می‌شود
T_{pfpf}	مقدار قطعه s که از مرکز قطعات پلاستیکی p به مرکز کارخانه f فرستاده می‌شود
Z_{mfmp}	مقدار قطعه s که از مرکز قطعات فلزی m به مرکز کارخانه f فرستاده می‌شود
H_{efef}	مقدار قطعه s که از مرکز قطعات الکترونیکی e به مرکز کارخانه f فرستاده می‌شود
Q_{ofs}	مقدار قطعه s که از مرکز قطعات سالم o به مرکز کارخانه f فرستاده می‌شود
K_{fyh}	مقدار محصول h که از مرکز کارخانه f به مرکز مشتری y فرستاده می‌شود
S_{lyh}	مقدار محصول سالم h که از مرکز احیا و تعمیر I به مرکز مشتری y فرستاده می‌شود
CO_n	مقدار CO_2 منتشرشده از حمل‌ونقل محصولات در شبکه
CK_s	مقدار CO_2 منتشرشده از قطعات در شبکه
CO_2	مقدار منتشرشده CO_2 در شبکه لجستیک معکوس

qp_{ofpp}	تعداد قطعات pp که از مرکز قطعات جدید به کارخانه فرستاده می‌شود
qm_{ofmp}	تعداد قطعات mp که از مرکز قطعات جدید به کارخانه فرستاده می‌شود
qe_{ofep}	تعداد قطعات ep که از مرکز قطعات جدید به کارخانه فرستاده می‌شود
MR_{kmp}	تعداد نقاط فلزی در مرکز جداسازی
ER_{kep}	تعداد نقاط الکترونیکی در مرکز جداسازی
PR_{kpp}	تعداد نقاط پلاستیکی در مرکز جداسازی
T_{ih}	زمان جمع‌آوری محصولات برگشتی در مرکز جمع‌آوری i

جدول ۶: متغیرهای باینری

C_j^{co}	اگر مرکز کنترل و بازرسی در نقطه j احداث شود: ۱ در غیر این صورت: 0
C_k^{co}	اگر مرکز جداسازی و دمونتاژ در نقطه k احداث شود: 1 در غیر این صورت: 0
C_l^{co}	اگر مرکز احیا و تعمیر در نقطه l احداث شود: 1 در غیر این صورت: 0
C_o^{co}	اگر در نقطه o انبار قطعات سالم احداث شود: 1 در غیر این صورت: 0
C_m^{co}	اگر مرکز جمع‌آوری قطعات پلاستیکی در نقطه m احداث شود: 1 در غیر این صورت: 0
C_f^{co}	اگر مرکز کارخانه در نقطه f احداث شود: 1 در غیر این صورت: 0
C_n^{co}	اگر مرکز انهدام ایمن در نقطه n احداث شود: 1 در غیر این صورت: 0
C_p^{co}	اگر مرکز جمع‌آوری قطعات پلاستیکی در نقطه p احداث شود: 1 در غیر این صورت: 0
C_e^{co}	اگر مرکز جمع‌آوری قطعات الکترونیکی در نقطه e احداث شود: 1 در غیر این صورت: 0

۲-۳- تابع هدف

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در این تحقیق قصد داریم مدلی برای طراحی شبکه لجستیک معکوس ارائه دهیم، به‌طوری‌که هزینه‌های شبکه حداقل شود. بنابراین، با توجه به کمینه‌سازی هزینه‌ها مدلی باید ارائه شود که هم‌زمان هزینه‌های احداث تسهیلات، هزینه‌های حمل‌ونقل محصولات و قطعات بین تسهیلات، هزینه عملیات در تسهیلات و هزینه‌های حاصل از انتشار گاز CO₂ را کمینه کند. با توجه به تعاریف متغیرها و پارامترها و همچنین نکات بالا، تابع هدف مدل که شامل حداقل‌سازی موارد زیر می‌باشد:

هزینه احداث تسهیلات

۱. هزینه‌های حمل‌ونقل قطعات و محصولات بین تسهیلات
 ۲. هزینه عملیات در هر یک از تسهیلات
 ۳. هزینه‌های اثرات زیست‌محیطی در احداث، پردازش تسهیلات و حمل‌ونقل
 ۴. هزینه گارانتی
- تابع هدف به‌صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \text{MinZ} = & \sum_{j \in J} C_j^{co} g_j + \sum_{k \in K} C_k^{co} b s_k + \sum_{l \in L} C_l^{co} b_l + \sum_{f \in F} C_f^{co} d_f + \sum_{p \in P} C_p^{co} S o_p \\
 & + \sum_{m \in M} C_m^{co} S o_m + \sum_{e \in E} C_e^{co} S o_e + \sum_{n \in N} C_n^{co} b_n \\
 & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} X_{ijh} P_{ijh} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{h \in H} U_{jlh} I_{jlh} \\
 & + \sum_{l \in L} \sum_{y \in Y} \sum_{h \in H} W_{lyh} F_{lyh} \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{h \in H} B_{jkh} D_{jkh} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} \sum_{s \in S} C_{kns} T_{kns} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} V_{kps} A_{kps} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} M_{kms} B_{kms} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{e \in E} \sum_{s \in S} N_{kes} C_{kes} \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} T_{pfs} K_{pfs} \\
 & + \sum_m \sum_f \sum_s Z_{mfs} L_{mfs} \\
 & + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} H_{efs} O_{efs} \\
 & + \sum_{o \in O} \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} Q_{ofs} H_{ofs} \\
 & + \sum_{f \in F} \sum_{y \in Y} \sum_{h \in H} K_{fyh} E_{fyh} \\
 & + \sum_{l \in L} \sum_{y \in Y} \sum_{h \in H} S_{lyh} F_{lyh} \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} J O_j X_{jlp} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{h \in H} L o_l U_{jlh} \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{h \in H} k o_k B_{jkh} \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} N o_n (W_{jnh} + C_{kns}) \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} P o_p V_{kps} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} M o_m M_{kms} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{e \in E} \sum_{s \in S} E o_e N_{kes}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{f \in F} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{o \in O} FO_f(T_{pfs} + Z_{mfs} + H_{efs} + Q_{ofs}) \\
 & + \sum_{f \in F} \sum_{y \in Y} \sum_{l \in L} \sum_{h \in H} YO_y(K_{fyh} + S_{lyh}) + \alpha(co_2 - co_2^{cap}) \\
 & + Qu_h
 \end{aligned}$$

۳-۳- محدودیت‌ها

۳-۳-۱- محدودیت ظرفیت

این محدودیت بیان می‌کند که مقدار کالای برگشتی از مرکز ارسال به گیرنده باید کمتر از ظرفیت مرکز دریافت‌کننده باشد.

محدودیت (۱) بیان می‌کند که مقدار محصول برگشتی از واحد جمع‌آوری به واحد بازرسی و کنترل باید کوچکتر مساوی ظرفیت مرکز بازرسی و کنترل باشد.

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} X_{ijh} \leq jC_j C_j^{co} \quad \forall j \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{h \in H} D_{jkh} \leq K C_k C_k^{co} \quad \forall k \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{h \in H} U_{jlh} \leq L C_l C_l^{co} \quad \forall l \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} V_{kps} \leq P C_p C_p^{co} \quad \forall P \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} M_{kms} \leq M C_m C_m^{co} \quad \forall M \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} N_{kes} \leq E C_e C_e^{co} \quad \forall e \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{s \in S} T_{pfs} + \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} Z_{mfs} + \sum_{o \in O} \sum_{s \in S} H_{ofs} + \sum_{e \in E} \sum_{s \in S} Q_{efs} \leq F C_f C_f^{co} \quad \forall f \quad (7)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{h \in H} K_{fyh} + \sum_{l \in L} \sum_{h \in H} S_{lyh} \leq Y C_y C_y^{co} \quad \forall y \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{h \in H} W_{jnh} + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} C_{kns} \leq N C_n C_n^{co} \quad \forall n \quad (9)$$

۳-۲- محدودیت توازن ورودی و خروجی به هر مرکز

محدودیت توازن ورودی و خروجی در رابطه (۱۰) نشان می‌دهد که مقدار محصولی که از مرکز جمع‌آوری به مرکز کنترل ارسال می‌شود باید برابر با مقدار محصول برگشتی باشد.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ijh} = R_h \quad \forall h \quad (10)$$

$$L_h \sum_{i \in I} X_{ijh} = \sum_{l \in L} U_{ilh} \quad \forall h, j \quad (11)$$

$$K_h \sum_{i \in I} X_{ijh} = \sum_{k \in K} U_{jkh} \quad \forall h, j \quad (12)$$

$$N_n \sum_{i \in I} X_{ijh} = \sum_{n \in N} W_{jnh} \quad \forall h, j \quad (13)$$

$$L_h \sum_{j \in J} U_{jlh} = \sum_{y \in Y} S_{lyh} \quad \forall l, h \quad (14)$$

$$\sum_{h \in H} B_{jkh} = \sum_{p \in P} V_{kps} + \sum_{m \in M} M_{kms} + \sum_{n \in N} C_{kns} + \sum_{e \in E} N_{kes} \quad \forall k, s \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} V_{kps} = \sum_{f \in F} T_{pfs} \quad \forall p, s \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K} M_{kms} = \sum_{f \in F} Z_{mfs} \quad \forall m, s \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} N_{kes} = \sum_{f \in F} H_{efs} \quad \forall e, s \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} T_{pfs} + \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} Z_{mfs} \\ + \sum_{e \in E} \sum_{s \in S} H_{efs} + \sum_{o \in O} \sum_{s \in S} Q_{ofs} \\ = \sum_{y \in Y} \sum_{h \in H} K_{fyh} \quad \forall f \end{aligned} \quad (19)$$

$$\sum_{l \in L} S_{lyh} + \sum_{f \in F} K_{fyh} = D_{yh} \quad \forall y, h \quad (20)$$

$$lb_{ih} \leq T_{ih} \leq ub_{ih} \quad \forall i, h \quad (21)$$

۳-۳-۳- محدودیت انتشار CO₂ ناشی از حمل و نقل محصولات

$$E\left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} d_{ij} X_{ijh} + \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} d_{jn} W_{jnh} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \sum_{h \in H} d_{jn} U_{jlh} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{h \in H} d_{jk} B_{jkh} + \sum_{f \in F} \sum_{y \in Y} \sum_{h \in H} d_{fy} K_{fyh} + \sum_{l \in L} \sum_{y \in Y} \sum_{h \in H} d_{ly} S_{lyh}\right] = Co(h)$$

۳-۳-۴- محدودیت انتشار CO₂ ناشی از حمل و نقل قطعات:

$$E\left[\sum_{k \in K} \sum_{n \in N} \sum_{s \in S} d_{kn} C_{kns} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} d_{kp} V_{kps} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} d_{km} M_{kms} + \sum_{k \in K} \sum_{e \in E} \sum_{s \in S} d_{ke} N_{kes} + \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} d_{pf} T_{pfs} + \sum_{m \in M} \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} d_{mf} Z_{mfs} + \sum_{e \in E} \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} d_{ef} H_{efs} + \sum_{o \in O} \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} d_{of} Q_{ofs}\right] = Ck(s)$$

۳-۳-۵- محدودیت انتشار گاز CO₂ در کل شبکه:

$$Co(h) + Ck(s) = co_2$$

۳-۳-۶- محدودیت‌های نامنفی بودن متغیرها:

$$X_{ijh}, W_{jnh}, U_{jlh}, B_{jkh}, C_{kns}, V_{kps}, M_{kms}, N_{kes}, T_{pfs}, Z_{mfs}, H_{efs}, Q_{ofs}, K_{fyh}, S_{lyh} \geq 0$$

۳-۳-۷- محدودیت‌های صفر و یک:

$$\begin{aligned} C_j^{co} &= \{0,1\} & C_f^{co} &= \{0,1\} \quad \forall f \\ C_n^{co} &= \{0,1\} \quad \forall n & C_p^{co} &= \{0,1\} \quad \forall p \\ C_k^{co} &= \{0,1\} \quad \forall k & C_m^{co} &= \{0,1\} \quad \forall m \\ C_l^{co} &= \{0,1\} \quad \forall l & & \end{aligned}$$

$$C_o^{CO} = \{0,1\} \quad \forall o \qquad C_e^{CO} = \{0,1\} \quad \forall e$$

۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این تحقیق یک مثال عددی برای ارزیابی دقت مدل و حل آن ارائه شده است. مدل با ارائه دو محصول و سه قطعه حل شده است. تمامی پارامترها به‌عنوان داده‌های عددی وارد مدل شده‌اند.

جدول ۷: مجموعه نقاط مراکز

نام اندیس	مراکز
مجموعه نقاط مراکز جمع‌آوری	I_1, I_2, I_3
مجموعه نقاط مراکز بازرسی و کنترل	J_1, J_2
مجموعه نقاط مراکز جداسازی و دمونتاژ	K_1, K_2, K_3
مجموعه نقاط مراکز احیا و تعمیر	L_1, L_2
مجموعه نقاط مراکز قطعات پلاستیکی	P_1, P_2
مجموعه نقاط مراکز قطعات فلزی	M_1, M_2
مجموعه نقاط مراکز قطعات الکترونیکی	E_1, E_2
مجموعه نقاط مراکز انهدام ایمن	N_1, N_2
مجموعه نقاط مراکز کارخانه	F_1, F_2, F_3
مجموعه نقاط انبار قطعات سالم	O_1, O_2, O_3
مجموعه نقاط مراکز مشتری	Y_1, Y_2
مجموعه تمام محصولات	H_1, H_2
مجموعه تمام قطعات	S_1, S_2, S_3

جدول ۸: هزینه ثابت احداث مراکز

نام مرکز	هزینه احداث
مرکز جمع‌آوری	$I_1=10 \times 10^7, I_2=90 \times 10^6, I_3=75 \times 10^6$
بازرسی و کنترل	$J_1=20 \times 10^6, J_2=180 \times 10^6$

$K_1=120 \times 10^6, K_2=100 \times 10^6, K_3=90 \times 10^6$	جداسازی و مونتاژ
$L_1=80 \times 10^6, L_2=90 \times 10^6$	احیا و تعمیر
$P_1=30 \times 10^6, P_2=40 \times 10^6$	قطعات پلاستیکی
$M_1=70000000, M_2=65 \times 10^6$	قطعات فلزی
$E_1=60 \times 10^6, E_2=70 \times 10^6$	قطعات الکترونیکی
$N_1=10 \times 10^6, N_2=80 \times 10^6$	انهدام ایمن
$F_1=130 \times 10^6, F_2=220 \times 10^6, F_3=250 \times 10^6$	کارخانه
$O_1=230 \times 10^6, O_2=220 \times 10^6, O_3=250 \times 10^6$	انبار قطعات سالم
$Y_1=70 \times 10^6, Y_2=60 \times 10^6$	مشتری

۴-۱- نتایج بهینه‌سازی شبکه

داده‌های فوق به عنوان ورودی وارد نرم‌افزار GAMS شده و مقادیر در نظر گرفته شده از متغیرها به دست آمده است. به عنوان مثال، جدول پاسخ (نتیجه) به صورت جدول ۹ ارائه می‌شود.

جدول ۹: مقدار محصولاتی که از مرکز جمع‌آوری به مرکز کنترل ارسال می‌شود

$X(i,j,h)$	i_1,j_1,h_1	i_1,j_1,h_2	i_1,j_2,h_1	i_1,j_2,h_2	i_2,j_1,h_1	i_2,j_1,h_2	i_2,j_2,h_1	i_2,j_2,h_2	i_3,j_1,h_1	i_3,j_1,h_2	i_3,j_2,h_1	i_3,j_2,h_2
	0	0	0	0	0	0	130	220	170	60	0	0

جدول ۱۰: مقادیر به دست آمده برای متغیر C_j^{CO}

C_j^{CO}	Amount
J_1	1
J_2	1

این جدول نشان می‌دهد که مراکز کنترل J_1 و J_2 باید در هر دو نقطه ایجاد شود.

جدول ۱۱: مقدار CO_2 منتشر شده از محصولات در شبکه CO_h

CO_1	1,128,045
--------	-----------

CO ₂	10,342,040
-----------------	------------

جدول ۱۲: مقدار تابع هدف

تابع هدف	2.426×10^{11}
----------	------------------------

جدول ۱۳: مقدار تابع هدف

زمان جمع‌آوری محصولات برگشتی در مرکز جمع‌آوری i	۱
---	---

۴-۲- آنالیز حساسیت

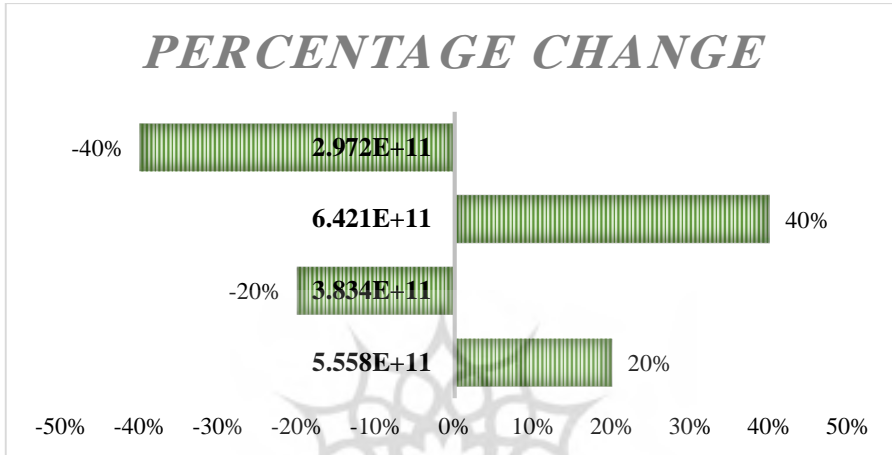
تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی برخی از پارامترهای اصلی مورد استفاده در مدل پیشنهادی برای طراحی شبکه لجستیک معکوس با تغییر مقادیر پارامترها با مقدار معین انجام می‌شود. تغییرات هزینه‌هایی که در تحلیل حساسیت در نظر گرفته می‌شوند و همچنین تأثیر آن تغییر بر مقدار تابع هدف در جدول ۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۱۴ تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی

Parameter	Percentage change	Objective Function
هزینه احداث مرکز انهدام ایمن	20%	4.69×10^{11}
	-20%	4.696×10^{11}
	40%	4.697×10^{11}
	-40%	4.696×10^{11}
هزینه عملیات در مرکز کنترل	20%	4.696×10^{11}
	-20%	4.696×10^{11}
	40%	4.696×10^{11}
	-40%	4.696×10^{11}
هزینه انتشار مجاز CO ₂	20%	5.558×10^{11}
	-20%	3.834×10^{11}

	40%	6.421×10^{11}
	-40%	2.972×10^{11}

در شکل ۳، تجزیه و تحلیل حساسیت هزینه انتشار مجاز پارامتر تغییر CO_2 در قالب یک نمودار ارائه شده است.



شکل ۳: تغییر تابع هدف با هزینه انتشار مجاز تغییر CO_2

پس از حل مدل و به دست آوردن مقدار بهینه، برای راستی آزمایی و مشخص شدن اعتبارسنجی مدل، مدل با دو داده متفاوت نیز حل شد.

۴-۲-۱- داده‌های ورودی

در حالت اول، تعداد تسهیلات (مانند تعداد مراکز کارخانه، مراکز قطعات جدید) تغییر کرده و بر اساس آن مدل حل شد. نتایج بهینه شبکه در جداول ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است:

جدول ۱۵: مقدار بهینه تابع هدف در دیتای ورودی اول

Objective Function	2.29×10^{14}
--------------------	-----------------------

جدول ۱۶: CO_h میزان انتشار CO_2 در شبکه لجستیک معکوس برای محصولات

CO_1	1,106,780
CO_2	1,056,018

در حالت دوم، تعداد تسهیلات و مقدار قطعات دریافتی و هزینه‌ها را تغییر می‌دهیم و سپس مدل را مجدد حل کردیم و نتایج در جداول ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.

جدول ۱۸: نتیجه بهینه شبکه در مورد دوم

Objective Function	4.199×10^{14}
--------------------	------------------------

جدول ۱۸: میزان انتشار CO_2 در شبکه لجستیک معکوس برای محصول CO_h

CO_1	225,900
CO_2	1,745,500

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای یک شبکه لجستیک معکوس برای محصولات برگشتی ارائه شده است. مدل پیشنهادی شامل یازده سطح، شبکه چند تدارکاتی و چندبخشی شامل مراکز جمع‌آوری، بازرسی و نگهداری، جداسازی و جداسازی قطعات، مرکز قطعات پلاستیکی، قطعات فلزی و قطعات الکترونیکی، مرکز قطعات جدید و کارخانه تولید، مرکز مشتریان و مرکز تخریب. این مدل به دنبال به حداقل رساندن هزینه‌های کل سیستم است. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های حمل‌ونقل محصولات و قطعات، هزینه تأسیسات ساختمانی، هزینه اثرات زیست‌محیطی و هزینه گارانتی می‌باشد. این مدل محصولاتی را جمع‌آوری می‌کند که در پایان عمر هستند یا قابل استفاده نیستند و یا محصولاتی که می‌توان از قطعات آن‌ها استفاده کرد به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند. علاوه بر این، محصول بازتولید شده در شبکه لجستیک معکوس می‌تواند باقیمت کمتری به دست مشتریان برسد که برای سود تولید نیز مهم است. مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار GAMS حل شد و نتایج با چند مثال عددی ارائه شد. با تغییر امکانات، مقادیر ظرفیت و غیره نتایج قابل قبولی به دست آمد. تعداد محصولات و قطعات فلزی پلاستیکی

الکترونیکی که از هر مرکز به مرکز دیگر ارسال می‌شود، میزان هر قطعه و محصول و ساخت یا عدم ساخت هر یک از تسهیلات به دست آمده است.

این مدل کاربردی است و می‌تواند صنایعی را که تولیدات آن‌ها در پایان عمرشان است، پشتیبانی کند. مزیت این روش این است که سازمان‌های تولیدی می‌توانند لجستیک معکوس را در سازمان خود ایجاد کنند و طراحی شبکه‌ای مانند تحقیقات هزینه‌های آن‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین با کمک نرم‌افزار مذکور می‌تواند پس از مدل‌سازی عددی تمامی تغییرات را در دست داشته باشند.

۶- پیشنهاد تحقیق

با توجه به نیاز به تحقیق در مورد نگرانی‌های زیست‌محیطی، به تولیدکنندگان محصولات خاص (مانند خودروسازان، کاغذ، شیشه، پلاستیک و غیره) توصیه می‌شود از مدل‌های طراحی شبکه لجستیک معکوس در فرآیندهای شرکت خود استفاده کنند. داشتن زنجیره تأمین کارآمدتر و منعطف‌تر برای کاهش آلودگی زیست‌محیطی و استفاده از محصولات جمع‌آوری شده از مشتریان به عنوان ماده اولیه چرخه تولید خود که از این طریق هزینه‌ها کاهش می‌یابد. آن‌ها علاوه بر دفع ایمن زباله، از قوانین لجستیک سبز نیز پیروی می‌کنند.

همچنین به مصرف‌کنندگان توصیه می‌شود محصولات مصرفی را که حضور آن‌ها در طبیعت باعث آلودگی محیط‌زیست و سازگار با طبیعت نمی‌شود، جمع‌آوری کنند و با شرکت‌های آشنا به فرآیندهای لجستیکی همکاری کنند. آن‌ها می‌توانند محصولات بازسازی شده را با کیفیتی تقریباً مشابه با کیفیت محصول اصلی و با قیمت کمتر خریداری کنند.

۱- از همان شرایط عدم قطعیت می‌توان برای یک شبکه حلقه بسته و در هزینه حمل‌ونقل استفاده کرد.

۲- در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به اهدافی مانند پاسخگویی و پایداری شبکه شده است. در نظر گرفتن آن‌ها در مدل‌های طراحی شبکه می‌تواند بسیار جذاب باشد.

۳- علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، اثرات اقتصادی و اجتماعی ضایعات را می‌توان در مدل طراحی شبکه در نظر گرفت.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

References:

- Abu-Qdais, H. M. Al-Ghazo, and E. Al-Ghazo, *Statistical analysis and characteristics of hospital medical waste under novel Coronavirus outbreak*. Global Journal of Environmental Science and Management, 2020. **6**(Special Issue (Covid-19)): p. 21-30. <https://doi.org/10.22034/GJESM.2019.06.SI.03>
- Abdallah, T., A. Diabat, and D. Simchi-Levi. *A carbon sensitive supply chain network problem with green procurement*. in *The 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering*. 2010. IEEE
- Bautista, J. and J. Pereira, *Modeling the problem of locating collection areas for urban waste management. An application to the metropolitan area of Barcelona*. Omega, 2006. **34**(6): p. 617-629. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.013>
- Das, S. and B.K. Bhattacharyya, *Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes*. Waste Management, 2015. **43**: p. 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.033>
- Gharibi, K. and S. Abdollahzadeh, *A mixed-integer linear programming approach for circular economy-led closed-loop supply chains in green reverse logistics network design under uncertainty*. Journal of Enterprise Information Management, 2021. <https://doi.org/10.1108/JEIM-11-2020-0472>
- Govindan, K. et al. *Fuzzy multi-objective approach for optimal selection of suppliers and transportation decisions in an eco-efficient closed loop supply chain network*. Journal of Cleaner Production, 2017. **165**: p. 1598-1619. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.180>
- Govindan, K. et al. *Medical waste management during coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak: A mathematical programming model*. Computers & Industrial Engineering, 2021. **162**: p. 107668. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107668>
- Hashemi, S.E. *A fuzzy multi-objective optimization model for a sustainable reverse logistics network design of municipal waste-collecting considering the reduction of emissions*. Journal of

- Cleaner Production, 2021. **318**: p. 128577.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128577>
- Homayouni, Z. and M.S. Pishvae, *A bi-objective robust optimization model for hazardous hospital waste collection and disposal network design problem*. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2020. **22**: p. 1965-1984
<https://doi.org/10.1007/s10163-020-01081-8>
 - Jaunich, M.K. et al. *Life-cycle modeling framework for electronic waste recovery and recycling processes*. Resources, Conservation and Recycling, 2020. **161**: p. 104841
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104841>
 - Kargar, S. M. Pourmehdi, and M.M. Paydar, *Reverse logistics network design for medical waste management in the epidemic outbreak of the novel coronavirus (COVID-19)*. Science of the Total Environment, 2020. **746**: p. 141183.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141183>
 - Kannan, G., P. Sasikumar, and K. Devika, *A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling*. Applied mathematical modelling, 2010. 34(3): p. 655-670
 - Kilic, H.S. U. Cebeci, and M.B. Ayhan, *Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey*. Resources, Conservation and Recycling, 2015. **95**: p. 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.12.010>
 - Lee, C. et al. *A mathematical model for municipal solid waste management—A case study in Hong Kong*. Waste management, 2016. **58**: p. 430-441
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.017>
 - Li, G. J. Liu, and A. Giordano, *Robust optimization of construction waste disposal facility location considering uncertain factors*. Journal of Cleaner Production, 2022. **353**: p. 131455
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131455>.
 - Nanaki, E.A. C.J. Koroneos, and G.A. Xydis, *Environmental impact assessment of electricity production from lignite*. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2016. **35**(6): p. 1868-1875 <https://doi.org/10.1002/ep.12427>.
 - Ottoni, M. P. Dias, and L.H. Xavier, *A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil*. Journal of Cleaner Production, 2020. **261**: p. 120990
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120990>
 - Pishvae, M.S., J. Razmi, and S.A. Torabi, *Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network*

-
- design: A new approach.* Fuzzy sets and systems, 2012. **206**: p. 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2012.04.010>
- Yu, H., et al., *A stochastic network design problem for hazardous waste management.* Journal of cleaner production, 2020. **277**: p. 123566 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123566>
 - Xiao, Z., et al., *Location-allocation problem of reverse logistics for end-of-life vehicles based on the measurement of carbon emissions.* Computers & Industrial Engineering, 2019. **127**: p. 169-181 . <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.012>
 - Zarbakhshnia, N., et al., *A novel multi-objective model for green forward and reverse logistics network design.* Journal of cleaner production, 2019. **208**: p. 1304-1316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.138>

COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Advances in Modern Management Engineering Journal. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

