# چکیده

# مقدمه

یکی از مسائلی که در دهه‌های اخیر ذهن انسان‌ها را به خود مشغول کرد، جلوگیری از تخریب و نابود محیط‌زیست است. میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای، در صد سال اخیر، افزایش قابل‌توجه ای داشته است به‌گونه‌ای بر اساس گزارش "مرکز تجزیه‌وتحلیل اطلاعات دی‌اکسید کربن[[1]](#footnote-1)" میزان غلظت دی‌اکسید کربن در سال 1958 از 315 بخش در میلیون[[2]](#footnote-2) به 409 بخش در میلیون در سال 2018 رسید است. منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه، مصرف سوخت‌های فسیلی است که از مهم‌ترین بخش­های مصرف‌کننده سوخت‌های فسیلی می‌توان به حمل‌ونقل، تولید برق، کارخانه‌ها، مصارف خانگی و کشاورزی اشاره کرد که در این میان حمل‌ونقل و کارخانه‌ها بیشترین سهم را در مصرف سوخت‌های فسیلی و درنتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته‌اند. زنجیره تأمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش­های صنعت، که شامل فعالیت‌های حمل‌ونقل، تولید و .... است، سهم قابل‌توجهی در مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار کربن دارد.

طلای کثیف نامی است که برای پسماندها انتخاب شده است که استفاده صحیح از آن‌ها می‌توان کمک قابل‌توجهی به کاهش هزینه‌های تولید و سودآوری کند. با جمع‌آوری و بازیافت پسماندها می‌توان حجم آن‌ها را کاهش داد و میزان دفن پسماندها را به حداقل مقدار خود رساند، لازمه این کار طراحی زنجیره تأمین معکوس است در زنجیره تأمین معکوس نحوه جمع‌آوری، بازسازی، نوسازی و .... برنامه‌ریزی می‌شود.

تجهیزات الکترنیکی و الکتریکی به دلیل پیشرفت روزانه تکنولوژی و عرضه محصولات با تکنولوژی­های بالا، میزان تولید پسماند بالای دارند. پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی[[3]](#footnote-3) پتانسیل بالای برای بازگشت به چرخه­ای تولید را دارا هستند به دلیل این که، این محصولات تا پایان عمر مورد استفاده قرار نمیگیرند و معمولا قبل از پایان عمر به دلیل ورود تکنولوژی های جدید از رده خارج می­شود.

# مرور ادبیات

حوزه مطالعاتی مدیریت زنجیره تأمین WEEE را می‌توان به 4 دسته‌ای اصلی، 1- طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین، 2- تصمیم‌گیری و ارزیابی عملکرد، 3- تحلیل چارچوب مفهومی مطالعات و 4- مطالعات کیفی دسته‌بندی کرد[[1](#_ENREF_1)]. حوزه طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین به طراحی شبکه، مکان‌یابی، تخصیص جریان، انتخاب تکنولوژی تولید و .... می‌پردازد. به‌عنوان‌مثال: بر اساس دستورالعمل اتحادیه اروپا برای زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی تمامی کشورهای اروپای موظف به مدیریت WEEE هستند در تحقیقی تحت عنوان "مدل‌سازی شبکه معکوس برای WEEE: مطالعه موردی در پرتقال" گوس[[4]](#footnote-4) و همکاران [[2](#_ENREF_2)] برای اجرای کردن دستورالعمل اروپا WEEE ، به ارائه مدل ریاضی MILP[[5]](#footnote-5) برای طراحی شبکه معکوس پرداخته‌اند هدف مدل ریاضی مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری و مراکز دسته‌بندی است.

بخش از تحقیقات در حوزه تصمیم‌گیری و ارزیابی عملکرد فرایندهای زنجیره تأمین و لجستیک معکوس، شبکه، عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی سازمان‌ها و مشاغل مدیریت پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی متمرکزشده است. به‌عنوان نمونه تمور و همکاران [[3](#_ENREF_3)] در مقاله‌ای تحت عنوان "انتخاب مکان تسهیلات در لجستیک معکوس با استفاده روش تصمیم‌گیری فازی نوع 2" به ارائه یک رویکرد چند معیارِ برای انتخاب مناسب‌ترین مکان تسهیلات لجستیک معکوس با استفاده از روش تاپسیس[[6]](#footnote-6) فازی نوع دوم پرداخته‌اند.

در چارچوب مفهومی سیستم مفاهیم، فرضیات، انتظارات، اعتقادات و نظریه‌های پژوهش طراحی می‌شود و همان‌طور که میلز و هوبرمن (1994) تعریف کرده‌اند چارچوب مفهومی یک محصول بصری و یا نوشتاری است که موضوع اصلی مطالعه، فرضیات و رابطه بین آن‌ها را توضیح می‌دهد. با توجه به این‌که مطالعه زنجیر تأمین پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی دارای پیچیدگی خاصی است و بازیگران زیادی در شکل‌گیری آن درگیر هستند یکی از حوزه‌های مطالعاتی "تحلیل چارچوب‌های مفهومی مطالعات" است که محققان به ارائه چارچوب‌های مفهومی می‌پردازند از نمونه‌های آن می‌توان به تحقیق ورونیکا قیزوفی[[7]](#footnote-7) و همکاران [[4](#_ENREF_4)] اشاره کرد که در یک پژوهش به بررسی میزان تأثیر قوانین نظارتی در افزایش میزان جمع‌آوری پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی پرداخته‌اند.

با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و تأثیر غیرقابل‌انکار زنجیره تأمین و افراد درگیر در این حوزه، یکی از دیگر از حوزه‌های مطالعاتی، مطالعات کیفی هستند که در این مطالعات به بررسی رفتار ذینفعان و مشتریان درگیر، پرداخته می‌شود از نمونه مطالعات این حوزه، مقاله "لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته: بررسی کامل برای کشف آینده" [[5](#_ENREF_5)] است که با بررسی 382 مقاله منتشرشده در بازه زمانی 2007 تا 2013 به طبقه‌بندی حوزه‌های تحقیقاتی لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته و تشریح آینده تحقیقات پرداخته است. از دیگر نمونه پژوهش­های این حوزه، پژوهش جعفری و همکاران [[6](#_ENREF_6)] است که به بررسی عوامل مهم مؤثر بر تشویقی مردم به شرکت در بازیافت زباله الکترونیکی پرداخته­اند. در این پژوهش نشان داده­اند که حدود 58.7 درصد از مردم ایران بدون هیچ طرح تشویقی تمایل به شرکت در برنامه­های بازیافت را دارند به علاوه نشان داده اند که از عوامل موثر بر شرکت در برنامه­های بازیافت 1- درآمد خانوار ، 2- اندازه خانوار ، 3- تحصیلات ، 4- سطح نگرانی در مورد پسماندهای الکترونیکی و 4- وضعیت تأهل است.

## زنجیره تأمین معکوس

شکری و علیرضایی[[7](#_ENREF_7)] در مقاله‌ای تحت عنوان "طراحی شبکه معکوس برای پسماندهای تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی و استفاده از الگوریتم ژنتیک"، یک مدل ریاضی برای مکان‌یابی مراکز جمع آوری و مراکز دفن در شبکه معکوس ارائه داده‌اند که در مدل هر سه بعد پایداری اقتصادی ، اجتماعی و محیط‌زیست در نظر گرفته‌شده است و برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند. (در این مدل میزان پسماندهای موجود در بازار در نظر گرفته نشده است و فرض بر این شده است که میزان پسماندها در دوره‌های زمانی مختلف به‌اندازه ظرفیت شبکه و یا بیشتر موجود است).

یکی از بخش‌های که در طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس می‌تواند در نظر گرفت بخش دمونتاژ[[8]](#footnote-8) است در این بخش، پسماندهای بازگشتی دمونتاژ شده و قسمت‌های قابل‌استفاده برای بازسازی ارسال و قسمت‌های غیرقابل استفاده برای دفن می‌شوند. در شبکه زنجیره تأمین معکوس طراحی‌شده توسط کینگ و ژاو[[8](#_ENREF_8)] بخشی تحت عنوان آزمودن در نظر گرفته‌شده است با همان مفهوم دمونتاژ با این تفاوت که در این بخش محصولات دمونتاز نمی‌شود تنها با آزمایش محصولات، تعیین می‌شود که پسماند برای بازیافت و یا دفن شود مدل ارئه شده در این مقاله، یک مدل ریاضی تک دوره‌ای و تک‌محصولی است که با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استوار، مدل حل‌شده است به‌علاوه هدف مدل بهینه‌سازی جریان شبکه و تعداد آزمایش‌های انجام‌شده در بخش آزمودن است.

میزان محصولات بازسازی‌شده و یا مواد اولیه‌ای که از پسماند می‌توان استخراج کرد یکی از بخش‌های مهم در طراحی زنجیره تأمین معکوس است که در خیلی از مقالات این مسئله به‌صورت نرخ ثابت در نظر گرفته‌شده است به‌عنوان‌مثال یو و سولوانگ [[9](#_ENREF_9)] در مقاله‌ای تحت عنوان "برنامه‌ریزی تصادفی با رویکرد بهبود معیارهای کلیدی روش مبتنی بر سناریو[[9]](#footnote-9) برای طراحی زنجیره تأمین معکوس پایدار WEEE" به مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری و طرح‌های بازسازی و بهینه‌سازی جریان بین تسهیلات پرداخته است. در مدل ارائه‌شده میزان محصولات و مواد بازسازی‌شده از پسماند یک نرخ ثابت است به‌علاوه پارامترهای قیمت محصولات بازسازی‌شده و مواد بازسازی‌شده تصادفی در نظر گرفته‌شده است. آیهزا و همکاران [[10](#_ENREF_10)] در مقاله‌ای تحت عنوان "طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس تصادفی برای WEEE" به مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری، مراکز دسته‌بندی در شبکه زنجیره تأمین معکوس پرداخته‌اند تسهیلات شبکه عبارت‌اند از: مرکز جمع‌آوری[[10]](#footnote-10)، مرکز دسته‌بندی[[11]](#footnote-11)، مرکز بازیافت[[12]](#footnote-12)، مرکز پالایش[[13]](#footnote-13)، بازار مواد اولیه و مرکز دفن. در مرکز دسته‌بندی تنها درصدی از پسماندها برای بازیافت ارسال می‌شدند و مابقی پسماندها دفن می‌شوند درصد پسماندهای که برای بازیافت ارسال می‌شوند به‌صورت تصادفی با تابع توزیع یکنواخت بین 0.8 و 0.9 تخمین زده‌شده است علاوه بر این پارامتر، مقدار پسماندها و هزینه حمل‌ونقل نیز به‌صورت تصادفی در نظر گرفته‌شده است.

کیلیک و همکاران [[11](#_ENREF_11)] در مقاله تحت عنوان "طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس برای WEEE در ترکیه" به مکان‌یابی سایت‌های ذخیره‌سازی و سایت‌های بازیافت پرداخته‌اند. در مطالعه موردی، این مقاله، 4 گروه پسماند لوازم‌خانگی بزرگ، فریزر و خنک‌سازها، تلویزیون و لوازم‌خانگی کوچک در نظر گرفته‌شده است که برای هر یک از 4 گروه پسماند یک نرخ بازیافت[[14]](#footnote-14) مختلف برآورد شده است. در مطالعه موردی مدل ریاضی برای 10 سناریو مختلف درباره میزان جمع‌آوری پسماندها حل‌شده است.

البادرویی و همکاران [[12](#_ENREF_12)] شبکه زنجیره تأمین معکوس E-Waste شامل 7 نوع مختلف تسهیلات جمع‌آوری، دسته‌بندی، بازیافت، تعمیرات، بازارهای دسته دوم، مراکز دفن و کارخانه‌ها ارائه کردند و در ادامه به ارائه مدل ریاضی جهت مکان‌یابی تسهیلات دسته‌بندی ، بازیافت و تعمیرات و تخصیص جریان بین تسهیلات پرداخته‌اند در تابع هدف مدل ارائه‌شده تنها بعد اقتصادی مسئله که شامل هزینه حمل‌ونقل، هزینه جمع‌آوری و هزینه راه‌اندازی تسهیلات در نظر گرفته‌شده است و سایر هزینه‌های بازسازی و بازیافت و دسته‌بندی پسماندها در نظر گرفته نشده است. در این مقاله برای حل مدل از روش غیردقیق (الگوریتم ژنتیک) استفاده‌شده است با توجه به کوچک بودن حجم مسئله، بررسی مزیت استفاده از روش‌های غیردقیق برای حل مدل لازم است چون‌که به نظر می‌رسد که روش‌های دقیق در این مسئله جواب‌گو است.

در خیلی از کشورها دولت مسئولیت جمع‌آوری و بازیافت محصولات را بر عهد شرکت‌ها تولیدکننده واگذار کرده است و همچنین قانون‌های نیز برای اجرای شده آن تصویب‌شده است. تاری و آلومور [[13](#_ENREF_13)] در راستای اجری کردن قانون مسئولیت تولیدکننده در ترکیه به پیکربندی شبکه زنجیره تأمین معکوس پرداخته‌اند هدف این مقاله مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری در یک شبکه 2 سطحی که شامل مناطق تولید، مراکز جمع‌آوری و شرکت‌ها است. در تابع هدف مدل ارائه‌شده برای پیکربندی شبکه 3 هدف بهینه‌سازی هزینه، ایجاد تعادل در میزان تقسیم پسماندهای اضافی در بین شرکت‌ها و کمترین واریانس در افق زمانی برنامه‌ریزی گرفته‌شده است. هزینه‌های در مدل عبارت‌اند از هزینه‌ای عملیات، هزینه راه‌اندازی مراکز جمع‌آوری، هزینه حمل‌ونقل و هزینه خرید به بسته‌ها. شهرداری ترکیه مصوب کرده که هر شرکت باید به میزان سهم بازار پسماند دریافت کند و مقدار اضافی به توی بین شرکت‌ها به صوت مساوی تقسیم شود به همین دلیل یکی از اهداف مدل حداقل سازی میزان اختلاف پسماند اضافی تقسیم‌شده است. در این مدل قیمت خرید پسماندها در نظر گرفته نشده است.

سیبل الومور و همکاران [[14](#_ENREF_14)] به ارائه زنجیره تأمین معکوس چند دورهٔ چند محصولِ پرداخته‌اند که هدف آن مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری، مراکز بازرسی و مراکز بازسازی است علاوه بر این در مدل ریاضی ارائه‌شده به تعیین ظرفیت این مراکز پرداخته‌شده است. ظرفیت مراکز به‌صورت مودولار[[15]](#footnote-15) در نظر گرفته‌شده است که هر یک از مراکز در ابتدا با یک ظرفیت اولیه راه‌اندازی می‌شوند و در طول دوره برنامه‌ریزی ظرفیت مراکز افزاش می‌یابد. در این پژوهش فرض شده است که کل پسماندهای جمع‌آوری‌شده قابلیت بازسازی رادارند که فرض یک فرض غیرواقعی است علاوه بر این فرض شده است که یک سازمان مسئولیت راه‌اندازی و بهره‌برداری شبکه معکوس را دارد و درآمد این سازمان از فروش محصولات بازسازی‌شده به سایر شرکت‌ها حاصل می‌شود. مدل ریاضی ارائه‌شده برای مطالعه موردی آلمان پیاده شده است.

## زنجیره تأمین حلقه بسته

چین و همکاران [[15](#_ENREF_15)] یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای بازیافت کارتریج در چین ارائه داده‌اند در این شبکه 4 شریک تأمین‌کننده، تولیدکننده، انبار و توزیع‌کننده در زنجیره تأمین پیشرو و 4 شریک مناطق مشتریان، مراکز جمع‌آوری، مراکز بازیافت و طرح‌های دفن در زنجیره تأمین معکوس در نظر گرفته‌شده است. در این شبکه پسماندها در مراکز بازیافت بر اساس کیفیت به دودسته خوب و بد تقسیم می‌شود که پسماندهای باکیفیت خوب بازسازی و به همراه محصولات نو به مشتریان فروخته می‌شود و پسمانده‌های با کیفت بد، دمونتاز و بخش قابل‌استفاده در تولید محصولات نو مورداستفاده قرار می‌گیرد و بخشه‌ای غیرقابل استفاده برای دفن ارسال می‌شود. در مدل ریاضی ارائه‌شده برای این شبکه قیمت خرید محصولات باکیفیت‌های مختلف یکسان در بدین ترتیب تولیدکنندگان می‌توانند مواد اولیه موردنیاز خود را از تأمین‌کنندگان مواد اولیه و یا مواد اولیه بازیافت شده تأمین کنند. گرفته‌شده است به‌عنوان‌مثال قیمت خرید کارتریج باکیفیت خوب که قابیلت تعمیر و استفاده دوباره از آن وجود دارد با کارتریج کیفت بد که قابلیت تعمیر و استفاده دوباره از آن وجود ندارد یکسان در نظر گرفته‌شده است همچنین قیمت فروش محصولات بازسازی‌شده و محصولات نو نیز یکسان است. در مدل ریاضی میزان بازگشت محصولات به زنجیره تأمین به‌عنوان پسماند به ازای هر منطقه یک نرخ ثابت تعریف‌شده است. برای بهینه‌سازی مدل تنها بعد اقتصادی مسئله در نظر گرفته‌شده است.

امین و ژانگ[[16](#_ENREF_16)] یک مدل 3 سطحی برای پیکربندی زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت پیشنهاد کرده‌اند. در شبکه طراحی‌شده پسماندهای مازاد بر ظرفیت زنجیره تأمین معکوس شبکه، به کارخانه‌های بازسازی برون سپار می‌شود. در سطح یک مدل پیشنهادی میزان تولید ، میزان بازسازی و میزان برون‌سپاری شبکه تعیین می‌شود برای این کار یک مدل تک دوره‌ای برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح غیرخطی (MINLP) ارائه داده‌اند که برای بهینه‌سازی این مدل تنها بعد اقتصادی (هزینه‌های راه‌اندازی، عملیات و درآمدهای حاصل فروش محصولات) لحاظ شده است در هزینه‌ها هزینه خرید پسماندها لحاظ نشده است. در سطح دوم مدل تأمین‌کننده‌ها، کارخانه‌های بازسازی قراردادی و سایت‌های بازسازی ارزیابی می‌شوند برای این کار از مدل گسترش عملکرد کیفیت[[16]](#footnote-16) (QFD) فازی استفاده‌شده است در سطح سوم این مدل مسئله‌ای انتخاب و تخصیص تأمین‌کننده، پیمانکاران بازسازی و سایت‌های بازسازی حل می‌شود. برای این کار یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح خطی (MILP) ارائه‌شده است.

در طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین 2 نوع گرایش تصمیم‌گیری متمرکز و غیرمتمرکز وجود دارد که در تصمیم گیر متمرکز فرض بر این است که تمام تصمیمات به‌صورت متمرکز گرفته می‌شود اما در تصمیم‌گیری غیرمتمرکز فرض می‌شود هر یک از بخشه‌ای زنجیره تأمین به‌صورت جداگانه بر اساس اهداف خود تصمیم می‌گیرند کیانگ کیانگ [[17](#_ENREF_17)] به طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته با تصمیمات غیرمتمرکز پرداخته‌اند شبکه ارائه‌شده، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته 3 سطحی که شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده و خرده‌فروشی است که مشتریان محصولات بازگشتی را به خرده‌فروشان می‌فروشند. در مدل ریاضی فرض شده است مشتریان در قبال محصولات جدید و محصولات تولیدشده از مواد اولیه بازیافتی بی‌تفاوت عمل می‌کنند و برای آن‌ها دارای ارزش یکسانی است در مل ارائه‌شده مقدار تقاضا به‌صورت تصادفی در نظر گرفته‌شده است. در مدل ریاضی ارائه‌شده برای بهینه‌سازی میزان تولید تولیدکننده میزان سود تولیدکننده برابر درآمد حاصل از فروش محصولات منهای هزینه‌های تولید و خرید مواد اولیه و پسماندهای و هزینه‌های تولید در نظر گرفته‌شده است بخش از پسماندها قابلیت استفاده رادارند و مابقی پسماندها غیرقابل استفاده هستند تفکیک بخش‌های قابل‌استفاده پسماندها دارای هزینه‌ای است که در مدل ریاضی در نظر گرفته نشده است. مقدار تقاضا به‌صورت تابعی از قیمت محصولات در نظر گرفته‌شده که تابع توزیع مقادیر تقاضا برای قیمت‌ها مختلف تخمین زده‌شده است. برای حل مدل ریاضی مثال عددی بیان‌شده است

مرور ادبیات مطالعات و پژوهش‌های که در حوزه مدیریت پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی انجام‌شده است نشان می‌دهد که فارغ از مدل‌های ریاضی ارائه‌شده و رویکردی که برای حل مدل در نظر گرفته‌شده است، در شبکه طراحی‌شده تسهیلات نوسازی در نظر گرفته نشده است. در میان پژوهش‌های انجام‌شده هیچ‌کدام محدودیت بودجه برای سرمایه‌گذاری ثابت را در نظر نگرفته‌اند به‌علاوه تعداد کمی از آن‌ها 3 بعد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته‌اند همچنین جای خالی موضوع کیفیت پسمانده و ارزش زمانی پول نیز در میان پژوهش‌ها احساس می‌شود.

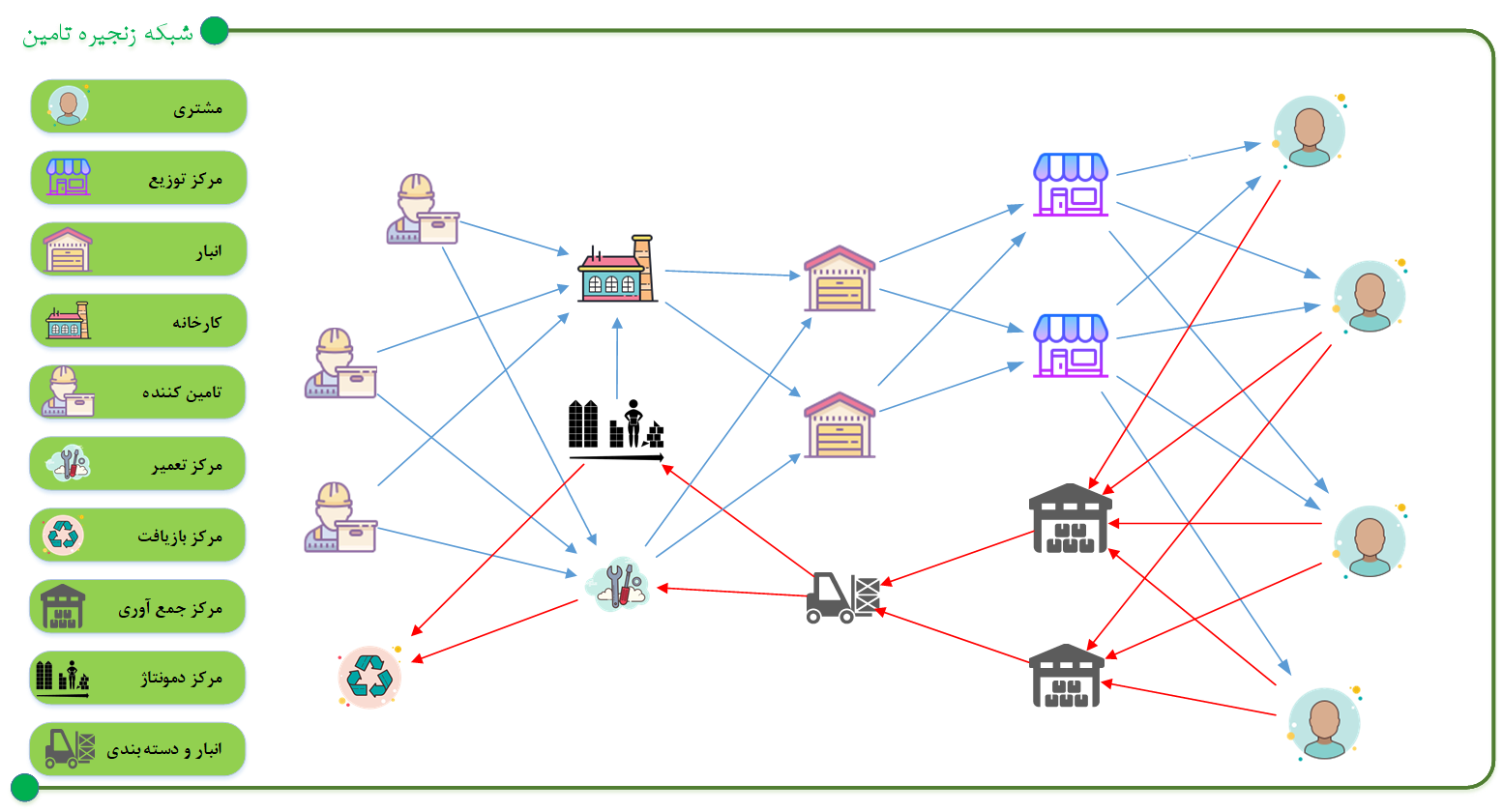
با توجه بررسی مرور ادبیات، وجود پژوهشی که به طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته بپردازد و حداقل ابعاد اقتصاد و زیست‌محیطی را در نظر بگیرد و یک برنامه زمانی برای پیاده‌سازی و راه‌اندازی شبکه طراحی‌شده با توجه به محدودیت بودجه ثابت ارائه دهد، لازم است. لازم به ذکر است اگرچه پژوهش‌های زیادی در این حوزه انجام‌شده است امّا ادبیات نشان می‌دهد که پژوهش مناسب که مدیریت پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی ایران بپردازد وجود ندارد.

# تعریف مسئله

شبکه طراحی‌شده در این پژوهش مطابق "شکل 1: شبکه زنجیره تامین حلقه بسته" است. هدف این شبکه یکپارچه‌سازی فعالیت‌های زنجیره تأمین پیشرو و معکوس است تسهیلات زنجیره تأمین پیشرو شامل: تأمین‌کننده، تولیدکننده، انبار، توزیع‌کننده است و تسهیلات زنجیره تأمین معکوس شامل مراکز جمع‌آوری، مرکز انبار و دسته بندی، مراکز دمونتاژ، مراکز تعمیر و مراکز بازیافت است پسماندهای جمع‌آوری‌شده در دو رده کیفیت قابل تعمیر و غیر قابل تعمیر دسته بنده می‌شوند و برای هرکدام از دسته‌ها یک قیمت متفاوت پرداخته می‌شود. پس از خریداری پسماندها در مراکز جمع آوری، پسماندها برای مراکز انبار و دسته بندی ارسال می­شود در این مراکز پسماند­ها انبار و به علاوه به دو گروه دسته بندی می­شوند و پسماندهای قابل تعمیر به تعمیرگاه ها و پسماندهای غیر قابل تعمیر برای مراکز دمونتاژ اراسال می­شود. در تعمیرگاه ها پسماندها تعمیر و در صورت لزوم برخی از قطعات آن تعویض و به انبار ارسال می­شود و فرض می­شود که کیفیت محصولات نو و محصولات تعمیر شده یکسان هستند. در مراکز دمونتاژ پسماند های دمونتاژ و قطعات قابل استفاد برای کارخانه­ها و قطعات غیر قابل استفاده به مراکز بازیافت ارسال می­شود.

مدل بهینه‌سازی شامل تصمیمات مکان‌یابی (کارخانه، انبار، تعمیر گاه­ها، مراکز دمونتاز ، مرکز انبار و دسته­بندی و مراکز بازیافت)، تعیین ظرفیت، تخصیص محصولات و پسماندها به تسهیلات و میزان جریان بین تسهیلات است مدل به‌صورت چند دوره‌ای و با در نظر گرفتن محدودیت بودجه مدل‌سازی شده است منظور از محدودیت بودجه، محدودیت در هزینه‌های ثابت برای راه‌اندازی تسهیلات است بنابراین راه‌اندازی تسهیلات شبکه طی چند دوره زمانی و بر اساس میزان بودجه تخصیص داده‌شده در هر دوره انجام و میزان بودجه اضافی در هر دوره با نرخ تورم به دوره بعد انتقال داده می‌شود.

برای مدل 2 هدف کمینه‌سازی خالص هزینه‌ها و تأثیرات محیط‌زیست در نظر گرفته‌شده است که خالص هزینه‌ها برابر مجموع هزینه‌های راه‌اندازی تسهیلات، حمل‌ونقل (حمل‌ونقل مواد اولیه، پسماند و محصولات)، عملیات (هزینه تولید، دمونتاژ، تعمیر، دسته بندی) و خرید مواد اولیه و پسماند منهای درآمدهای حاصل از فروش محصولات و پسماندهای دمونتاژ شده است. برای کمینه‌سازی تأثیرات محیط‌زیستی از سیاست‌های انتشار کربن استفاده‌شده است. نرخ مالیات انتشار کربن به‌صورت پله‌ای در نظر گرفته می‌شود که با افزایش میزان انتشار کربن نرخ مالیات افزایش می‌یابد و منابع انتشار کربن شامل حمل‌ونقل، تولید و بازسازی است.



شکل 1: شبکه زنجیره تامین حلقه بسته

## فرمول‌بندی

در این بخش مجموعه­ها و اندیس­ها مورد استفاده در مدل ریاضی تعریف می­شود.

جدول 1: جدول مجموعه‌ها

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| توضیح | نماد | # | توضیح | نماد | # |
| مجموعه ظرفیت‌های انبارها | H(i) | 11 | مجموعه تأمین‌کننده‌ها ، s ϵ S | S | 1 |
| مجموعه ظرفیت‌های مراکز دمونتاژ | H(d) | 12 | مجموعه تولیدکنندگان f ϵ F | F | 2 |
| مجموعه ظرفیت‌های تعمیرگاه ها | H(n) | 13 | مجموعه مراکز بازیافت q ϵ Q | Q | 3 |
| مجموعه ظرفیت‌های مراکز بازیافت | H(q) | 14 | مجموعه مراکز دمونتاز d ϵ D | D | 4 |
| مجموعه ظرفیت مرکز انبار و دسته­بندی | H(g) | 15 | مجموعه تعمیرگاه ها n ϵ N | N | 5 |
| مجموعه ظرفیت‌های تولید برای محصول p | H(p) |  | مجموعه مراکز انبار | I | 7 |
| مجموعه پله‌های مالیات انتشار کربن | Ta |  | مجموعه مراکز جمع آوری | B |  |
| مجموعه دوره‌های برنامه‌ریزی | T |  | مجموعه مراکز توزیع | Z | 8 |
| مجموعه محصولات | P | 19 | مجموعه مواد اولیه | J | 9 |
|  |  |  | مجموعه مراکز انبار و دسته­بندی | G |  |

جدول 2: لیست پارامترهای مدل

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| توضیح پارامتر | نماد | # |
| هزینه راه‌اندازی تولید محصول p و ظرفیت h در دوره t |  | 1 |
| هزینه راه‌اندازی انبار با ظرفیت h در دوره t |  | 2 |
| هزینه راه‌اندازی دمونتاژ با ظرفیت h در دوره t |  | 3 |
| هزینه راه‌اندازی تعمیرگاه با ظرفیت h در دوره t |  | 4 |
| هزینه راه‌اندازی بازیافت با ظرفیت h در دوره t |  | 6 |
| هزینه راه اندازی مرکز انبار و دسته بندی با ظرفیت h در دوره t |  |  |
| فاصله بین تسهیلات e و b |  | 7 |
| هزینه حمل‌ ماده اولیه j در دوره t |  | 8 |
| هزینه حمل‌ونقل محصول در دوره t |  | 9 |
| هزینه تولید محصول p در دوره t |  | 10 |
| هزینه نگهداری محصول در دوره t |  | 11 |
| هزینه دمونتاژ محصول در دوره t |  | 12 |
| هزینه تعمیر محصول در دوره t |  | 13 |
| هزینه انبار و دسته بندی پسماند ها در دوره t |  | 14 |
| هزینه خرید مواد اولیه j در دوره t از تأمین‌کننده s |  | 15 |
| قیمت فروش پسماند j در دوره t |  | 16 |
| قیمت فروش محصول در دوره t |  | 17 |
| قیمت خرید پسماند دارای کیفیت قابل تعمیر |  | 18 |
| قیمت خرید پسماند دارای کیفیت غیر قایل تعمیر |  | 19 |
| نرخ انتشار یک کیلو گرم کربن به ازای تولید محصول با استفاده از تکنولوژیo (کیلو گرم) |  | 21 |
| نرخ انتشار کربن برای حمل محصول |  | 22 |
| نرخ انتشار کربن وسیله نقلیه کربن برای حمل مواد اولیه j |  | 23 |
| تعداد مواد اولیه j در محصول p |  | 24 |
| ظرفیت تولید با ظرفیت h (دستگاه) |  | 25 |
| ظرفیت انبار با ظرفیت h (مترمکعب) |  | 26 |
| ظرفیت مرکز دمونتاژ با ظرفیت h (تن) |  | 27 |
| ظرفیت مرکز تعمیر با ظرفیت h (تن) |  | 28 |
| ظرفیت مرکز بازیافت با ظرفیت h (تن) |  | 30 |
| ظرفیت مرکز انبار و دسته بندی پسماند با ظرفیت h (تن) |  |  |
| بودجه راه‌اندازی در دوره t |  | 31 |
| نرخ تورم |  | 32 |
| درصد قطعات نوع j قابل استفاده در پسماندهای غیر قابل تعمیر |  | 33 |
| درصدی از قطعات j در پسماندهای قابل تعمیر که باید تعویض شوند. |  | 34 |
| درصد پسماندها با قابل تعمیر |  | 35 |
| تقاضای محصول مرکز توزیع z در دوره t |  | 37 |
| یک مقدار خیلی بزرگ |  | 38 |
| نرخ مالیات انتشار کربن در پله ta |  | 39 |
| درصد پسماند های بازگشتی |  | 37 |
| سقف میزان انتشار در پله ta |  | 41 |
| وزن محصول p (تن) |  | 42 |
| حجم محصول p (متر مکعب) |  | 43 |

در این بخش متغیرهای تصمیم مورد استفاده در مدل ریاضی تعریف می­شود

جدول 3: لیست متغیرهای مدل ریاضی

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| # | نماد | توضیح متغیر تصمیم |
| 1 |  | 1 راه اندازی انبار i با ظرفیت h در دوره t  0 در غیر این صورت |
| 2 |  | 1 راه اندازی تولیدی f برای تولید p و ظرفیت h در دوره t  0 در غیر این صورت |
| 3 |  | 1 راه اندازی بازیافتی q با ظرفیت h در دوره t  0 در غیر این صورت |
| 4 |  | 1 راه اندازی دمونتاژ d با ظرفیت h در دوره t  0 در غیر این صورت |
| 5 |  | 1 راه اندازی تعمیرگاه n با ظرفیت h در دوره t  0 در غیر این صورت |
|  |  | 1 راه اندازی مرکز انبار و دسته بندی g با ظرفیت h در دوره t  0 در غیر این صورت |
| 9 |  | 1 پر شدن پله ta در دوره t  0 در غیر این صورت |
| 11 |  | میزان حمل‌ مواد اولیه j از تأمین‌کننده s به تولیدی f در دوره t |
| 12 |  | میزان حمل‌ونقل محصولات بین تسهیلات در دوره t |
| 13 |  | میزان تولید کارخانه f در دوره t با تکنولوژی o |
| 14 |  | میزان انتشار در پله ta |
| 15 |  | موجودی محصولات نو در انبار i محصول p در دوره t |
| 16 |  | موجودی پسماند قابل تعمیر در انبار g در دوره t |
| 17 |  | موجودی پسماندغیر قابل تعمیر در انبار g در دوره t |

### مدل ریاضی

در این بخش تابع هدف و محدودیت­های مدل ریاضی تعریف می­شود

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

مقدار تابع هدف برابر مجموع خالص هزینه‌ها به‌علاوی مجموع مالیات بر انتشار کربن در دوره­های برنامه ریزی است. معادله نشان می‌دهد که خالص هزینه‌ها برابر مجموع هزینه‌های ثابت راه‌اندازی، هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های عملیات و هزینه خرید مواد اولیه و پسماندها منهای سود فروش محصولات است. معادله نشان می‌دهد مجموع هزینه راه‌اندازی برابر مجموع هزینه راه‌اندازی در هر دوره است.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

معادله مجموع هزینه‌های راه‌اندازی در هر دوره را نشان می‌دهد که برابر مجموع هزینه راه‌اندازی تولیدکننده ، انبار، مراکز دمونتاژ، مراکز نوسازی، مراکز بازسازی و مراکز بازیافت است.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

معادله هزینه‌های حمل‌ونقل را نشان می‌دهد هر یک از بخش­های معادله به ترتیب نشان دهنده هزینه حمل‌ونقل محصولات از کارخانه به انبار، از انبار به توزیع کننده، از مراکز جمع آوری به مراکز انبار و دسته بندی، از مراکز انبار و دسته بندی به تعمیرگاه­ها، از مراکز انبار و دسته بندی به مراکز دمونتاژ، از مراکز تعمییر به انبار محصولات نو و هزینه حمل ونقل مواد اولیه از مراکز دمونتاژ به کارخانه­ها، از مراکز دمونتاژ به مراکز بازیافت، از تامین کننده به تعمیرگاه­ها، از تامین کنندگان به کارخانه­ها و از مراکز تعمیر به مراکز بازیافت است.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

معادله هزینه عملیات را نشان می‌دهد که برابر مجموع هزینه‌های تولید، دمونتاژ ، تعمیر، انبار و دسته بندی پسماندها و هزینه انبارداری است. هزینه نگهداری در انبارها برابر با حاصل ضرب هزینه نگهداری هر دوره درمجموع محصولات ارسال شده به مراکز توزیع و موجودی محصولات نو است.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

معادله هزینه خرید مواد اولیه را نشان می‌دهد که بخش اول و دوم آن مجموع هزینه خرید مواد اولیه برای واحدهای تولیدی و تعمیرگاه ها است و بخش دوم هزینه خرید پسماندها را نشان می‌دهد.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

معادله مجموع سود ناشی از فروش محصولات و پسماندها را نشان می‌دهد. معادله میزان انتشار کربن را نشان می‌دهد که برابر با مجموع انتشار کربن در مراکز تولیدی و حمل‌ونقل است. معادله میزان انتشار کربن در حمل‌ونقل را نشان می‌دهد که برابر نرخ انتشار کربن ضرب در مصافت حمل شده ضرب در تعداد محصول است و معادله میزان انتشار کربن در تولید محصولات را نشان می‌دهد.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

معادله­های - محدودیت­های خطی سازی تابع مالیات انتشار کربن را نشان می­دهد همچنین محدودیت *مجموع مالیات انتشار کربن را نشان می­دهد که با نرخ تورم جمع شده اند.*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

محدودیت تعادل جریان در مراکز تولیدی را نشان می‌دهد که باید میزان ورودی هر یک از مواد اولیه از تأمین‌کنندگان و واحدهای دمونتاژ برابر میزان مواد اولیه استفاده‌شده در محصولات خروجی باشد.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

محدودیت‌های و تعادل جریان را در واحدهای دمونتاژ را نشان می‌دهد که میزان وردودی در هر دوره برابر میزان خروجی دوره آینده است و به علاوه میزان خروجی دوره اول صفر خواهد بود و محدودیت بیان میکند که در دروه اول هیچ محصولی برای مرکز بازیافت ارسال نمی­شود و محدودیت بیان می­کند که در دوره اول هیچ پسماندی برای مراکز بازیافت ارسال نمی­شود.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

محدودیت‌های و تعادل جریان در تعمیرگاه را نشان می‌دهد که میزان خروجی هر دوره برابر میزان ورودی دوره قبل است.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

محدودیت تعادل جریان محصولات در انبار را نشان می‌دهد که در این معادله مجموع محصولات تعمیرشده و محصولات نو به علاوه موجودی انبار در دوره قبل باید برابر مجموع محصولات ارسال شده به مراکز توزیع و موجودی دوره جاری باشد. محدودیت و تعادل جرایان مراکز انبار و دسته بندی را نشان می­دهد.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |

معادله محدودیت ظرفیت واحدهای تولیدی را نشان می‌دهد و محدودیت تضمین می‌کند که واحد تولید تنها با یک سطح تولید، برای یک نوع محصول و در یک دوره راه‌اندازی می‌شود.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |

معادله  *محدودیت ظرفیت انبارها را نشان می‌دهد. محدودیت تضمین* می‌کند که انبار تنها با یک سطح تولید و در یک دوره راه‌اندازی شود.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |

محادلات و محدودیت های ظرفیت تسهیلات انبار و دسته بندی پسماند­ها هستند.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |

معادله ، محدودیت ظرفیت مرکز دمونتاژ را نشان می‌دهد واحد ظرفیت مراکز دمونتاژ تن می­باشد به همین دلیل مقدار محصولات در وزن آن­ها ضرب می­شود و محدودیت تضمین می‌کند که واحد دمونتاژ تنها با یک سطح ظرفیت و در یک دوره راه‌اندازی شود.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |

معادله محدودیت ظرفیت تعمیرگاه­ها را نشان می‌دهد واحد ظرفیت مراکز نوسازی تن می­باشد به همین دلیل مقدار محصولات در وزن آن­ها ضرب می­شود و محدودیت تضمین می‌کند که تعمیرگاه تنها با یک سطح ظرفیت و در یک دوره راه‌اندازی شود.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |

معادله محدودیت ظرفیت مراکز بازیافت را نشان می‌دهد. واحد ظرفیت مراکز بازیافت، تن می­باشد به همین دلیل مقدار محصولات در وزن آن­ها ضرب می­شود محدودیت تضمین می‌کند که واحد بازیافت تنها با یک سطح ظرفیت و در یک دوره راه‌اندازی شود.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

معادله محدودیت بودجه هزینه راه اندازی را نشان می­دهد که میزان هزینه در هر دوره باید کم تر از مجموعه بودجه دوره جاری و باقی مانده بودجه­ها دوره قبل باشد.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |

*معادله برآورد شدن تقاضا در هرکدام از توزیع‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. معادله میزان بازگشت کل پسماندها را نشان می‌دهد.*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

محدودیت­هایمحدودیت باینری بود محدودیت ها را تعیین می­کند و محدودیت محدودیت متغیرهای عدد صحیح است و محدودیت محدودیت متغیر های اعداد طبیعی است.

# منابع و مراجع

[1] M. T. Islam and N. Huda, "Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review," *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 137, pp. 48-75, 2018.

[2] M. I. Gomes, A. P. Barbosa-Povoa, and A. Q. Novais, "Modelling a recovery network for WEEE: A case study in Portugal," *Waste Management,* vol. 31, no. 7, pp. 1645-1660, 2011.

[3] G. T. Temur, T. Kaya, and C. Kahraman, "Facility location selection in reverse logistics using a type-2 fuzzy decision aid method," in *Supply chain management under fuzziness*: Springer, 2014, pp. 591-606.

[4] V. Ghisolfi, G. d. L. D. Chaves, R. R. Siman, and L. H. Xavier, "System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers," *Waste management,* vol. 60, pp. 14-31, 2017.

[5] K. Govindan, H. Soleimani, and D. Kannan, "Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future," *European journal of operational research,* vol. 240, no. 3, pp. 603-626, 2015.

[6] A. Jafari, J. Heydari, and A. Keramati, "Factors affecting incentive dependency of residents to participate in e-waste recycling: a case study on adoption of e-waste reverse supply chain in Iran," *Environment, development and sustainability,* vol. 19, no. 1, pp. 325-338, 2017.

[7] S. Shokouhyar and A. Aalirezaei, "Designing a sustainable recovery network for waste from electrical and electronic equipment using a genetic algorithm," *International Journal of Environment and Sustainable Development,* vol. 16, no. 1, pp. 60-79, 2017.

[8] S. Qiang and X.-Z. Zhou, "Robust reverse logistics network design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) under recovery uncertainty," *Journal of environmental biology,* vol. 37, no. 5, p. 1153, 2016.

[9] H. Yu and W. Solvang, "A stochastic programming approach with improved multi-criteria scenario-based solution method for sustainable reverse logistics design of waste electrical and electronic equipment (WEEE)," *Sustainability,* vol. 8, no. 12, p. 1331, 2016.

[10] B. Ayvaz, B. Bolat, and N. Aydın, "Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment," *Resources, conservation and recycling,* vol. 104, pp. 391-404, 2015.

[11] H. S. Kilic, 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,* vol. 95, pp. 120-132, 2015.

[12] R. Elbadrawy, A. F. A. Moneim, and M. N. Fors, "E-waste reverse logistic optimization in Egypt," in *2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*, 2015: IEEE, pp. 1-6.

[13] I. Tari and S. A. Alumur, "Collection center location with equity considerations in reverse logistics networks," *INFOR: Information Systems and Operational Research,* vol. 52, no. 4, pp. 157-173, 2014.

[14] S. A. Alumur, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama, and V. Verter, "Multi-period reverse logistics network design," *European Journal of Operational Research,* vol. 220, no. 1, pp. 67-78, 2012.

[15] Y. Chen, F. Chan, and S. Chung, "An integrated closed-loop supply chain model with location allocation problem and product recycling decisions," *International Journal of Production Research,* vol. 53, no. 10, pp. 3120-3140, 2015.

[16] S. H. Amin and G. Zhang, "A three-stage model for closed-loop supply chain configuration under uncertainty," *International Journal of Production Research,* vol. 51, no. 5, pp. 1405-1425, 2013.

[17] Q. Qiang, K. Ke, T. Anderson, and J. Dong, "The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties," *Omega,* vol. 41, no. 2, pp. 186-194, 2013.

1. Carbon Dioxide Information Analysis Center [↑](#footnote-ref-1)
2. PPM [↑](#footnote-ref-2)
3. WEEE [↑](#footnote-ref-3)
4. MI Gomes [↑](#footnote-ref-4)
5. Mixed integer linear programming [↑](#footnote-ref-5)
6. TOPSIS [↑](#footnote-ref-6)
7. Verônica Ghisolfi [↑](#footnote-ref-7)
8. dis assembly [↑](#footnote-ref-8)
9. Scenario-Based [↑](#footnote-ref-9)
10. collecting centers [↑](#footnote-ref-10)
11. sorting centers [↑](#footnote-ref-11)
12. recycling centers [↑](#footnote-ref-12)
13. refinery centers [↑](#footnote-ref-13)
14. Recovery [↑](#footnote-ref-14)
15. modular [↑](#footnote-ref-15)
16. Quality function deployment [↑](#footnote-ref-16)