



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی صنایع

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان پایان نامه

طراحی شبکه توزیع و جمع آوری تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی با نگرش

زیست محیطی

نگارش

امیر مینائی

استاد راهنما

دکتر سعید منصور

مهر ۱۳۹۸

چکیده

واژه نامه

WEEE	Waste Electrical & Electronic Equipment
CLSC	Closed-loop supply chain
WCED	World Commission on Environment and Development
CAP	Consumption-based Accounting and Policy

فهرست مطالب

چکیده	۲
فهرست مطالب	۴
فهرست جداول	۶
فهرست اشکال	۷
۱. فصل اول: کلیات	۸
۱.۱- مقدمه	۹
۱.۲- بیان مسئله	۱۰
۱.۳- ضرورت پژوهش	۱۲
۱.۳.۱. هدف	۱۳
۱.۴- تعاریف	۱۳
۱.۴.۱. زنجیره تأمین	۱۳
۱.۴.۲. زنجیره تأمین معکوس	۱۴
۱.۴.۳. زنجیره تأمین حلقه بسته	۱۶
۱.۴.۴. پسماندهای تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی	۱۶
۱.۴.۵. توسعه پایدار	۱۷
۱.۴.۶. پایان عمر محصول	۱۷
۱.۴.۷. اثر گلخانه‌ای	۱۸
۱.۴.۸. انتشار کربن	۱۸
۱.۴.۹. مالیات انتشار کربن	۱۹
۱.۵- فرضیات و سؤالات پژوهش	۱۹
۱.۶- روش تحقیق	۲۱
۱.۶.۱. روش و ابزار گردآوری اطلاعات	۲۱
۱.۶.۲. قلمرو تحقیق	۲۲

۲۲	..... ۱.۷- نمایی کلی پژوهش
۲۵	..... فصل دوم: مرور ادبیات
۲۶	..... طبقه‌بندی مطالعات مدیریت زنجیره تأمین پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی
۲۸	..... زنجیره تأمین معکوس
۳۲	..... زنجیره تأمین حلقه بسته
۳۸	..... بررسی شکاف تحقیقاتی و جایگاه تحقیق
۴۱	..... جمع‌بندی فصل دوم
۴۳	..... فصل سوم: مدل‌سازی
۴۴	..... نرخ پلکانی مالیات کربن
۴۷	..... فرمول‌بندی
۵۸	..... منابع و مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱: تفاوت زنجیره تأمین و زنجیره تأمین معکوس [۹] ۱۵
- جدول ۲: خلاصه مطالعات بررسی شده ۳۵
- جدول ۳: جدول تحلیل شکاف ۳۹
- جدول ۴: جدول مجموعه ها ۴۷
- جدول ۵: لیست پارامتر های مدل ۴۸
- جدول ۶: لیست متغیرهای مدل ریاضی ۴۹

فهرست اشکال

- شکل ۱: سناریو انجام پژوهش ۲۲
- شکل ۲: نمودار جریان مواد در شبکه ۲۴
- شکل ۳: چارچوب ادبیات حوزه مدیریت زنجیره تأمین پسماند های الکتریکی و الکترونیکی ۲۸

۱. فصل اول: کلیات

۱/۱ - مقدمه

یکی از مسائلی که در دهه‌های اخیر ذهن انسان‌ها را به خود مشغول کرد، جلوگیری از تخریب و نابود محیط‌زیست است. انسان‌ها از زمان انقلاب صنعتی که سرآغاز مصرف چشمگیر سوخت‌های فسیلی توسط انسان بوده تا به امروز، نقشی کلیدی در روند تغییرات آب‌وهوایی و گرمایش جهانی به‌واسطه انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا کرده است میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای، در این دوره، افزایش قابل توجهی داشته است به‌گونه‌ای بر اساس گزارش "مرکز تجزیه و تحلیل اطلاعات دی‌اکسید کربن"^۱ میزان غلظت دی‌اکسید کربن در سال ۱۹۵۸ از ۳۱۵ بخش در میلیون^۲ به ۴۰۹ بخش در میلیون در سال ۲۰۱۸ 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 در نتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته‌اند. زنجیره تأمین و زنجیره تأمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های صنعت، که شامل فعالیت‌های حمل‌ونقل، تولید و است، سهم قابل توجهی در مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار کربن دارد که بر اساس آمار و اطلاعات ۱۳ درصد از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در نتیجه فعالیت‌های زنجیره تأمین و زنجیره تأمین است برنامه‌ریزی مناسب زنجیره تأمین می‌تواند تأثیر به‌سزای در کاهش هزینه‌های تولید داشته باشد به‌علاوه با در نظر گرفتن پارامترهای پایداری در برنامه‌ریزی زنجیره تأمین، میزان انتشار کربن نیز کاهش چشم‌گیری خواهد داشت.

امروز با رشد روزافزون جمعیت و گرایش مردم به مصرف‌گرایی، تولید پسماند افزایش سرسام‌آوری داشته است. پسماندها به مجموعه موادی که در اثر مصرف ساکنین و فعالیت‌های صنعتی، معدنی و خدماتی تولید می‌شود و عرفاً (از دید تولیدکننده) قابل مصرف نیست و نیاز به دفن و یا بازیابی دارند، گفته

^۱ Carbon Dioxide Information Analysis Center

^۲ PPM

می‌شود^[۱] که وجود آن‌ها در محیط‌زیست موجب نابودی محیط‌زیست و جانداران می‌شود. پسماندها مواد باارزشی هستند که استفاده صحیح از آن‌ها می‌توان کمک قابل‌توجهی به کاهش هزینه‌های تولید و سودآوری کند به همین دلیل پسماندها را با عنوان طلای کثیف می‌شناسند. 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.

در این فصل به ارائه پیش‌زمینه پژوهش پرداخته‌شده است در ابتدای فصل به بیان و تعریف دقیق مسئله می‌پردازیم در ادامه ضرورت پژوهش بررسی‌شده است که در این بخش بیان می‌شود که پژوهش پیش رو در چه ابعاد و از چه نظری برای جامعه علمی اهمیت دارد پس از آن به تعریف واژگان کلید و عباراتی که در کل پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد، پرداخته‌شده است. در بخش فرضیات و سؤالات پژوهش به بیان فرضیاتی که پژوهش برای پاسخ گوی به آن‌ها طراحی‌شده است بیان می‌شود. در آخر روش تحقیق و نحوه جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات بیان می‌شود.

۱/۲- بیان مسئله

امروزه تولید پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی (WEEE)^۱، روزبه‌روز در حال افزایش است این زباله‌ها موجب تخریب و آسیب‌های جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست می‌شوند و این امر موجب نگرانی حامیان محیط‌زیست شده است. مدیریت پایان عمر محصولات موجب کاهش آسیب به طبیعت می‌شود، شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته (CLSC)^۲ به عنوان یک ابزار برای مدیریت پایان عمر محصولات معرفی‌شده است. در زنجیره تأمین حلقه بسته با ایجاد هماهنگی بین زنجیره تأمین مستقیم و معکوس باعث افزایش

^۱ Waste Electrical & Electronic Equipment

^۲ Closed-loop supply chain

بهره‌وری سیستم می‌شود و ایجاد شبکه‌ای که امکان تعمیر و استفاده مجدد در آن وجود داشته باشد میزان پسماندهای که دفع می‌شوند به‌طور چشم‌گیری کاهش خواهد یافت. در یکی از مراحل مهم در طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته، مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات جمع‌آوری است.

شبکه طراحی‌شده در این پژوهش مطابق "شکل ۲: نمودار جریان مواد در شبکه" 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، انبار، مراکز دمونتاژ، مراکز بازسازی، مراکز نوسازی و مراکز بازیافت است که در این شبکه حلقه بسته، تسهیلات مراکز جمع‌آوری و توزیع و همچنین انبارهای زنجیره تأمین پیشرو و زنجیره تأمین معکوس تجمیع شده است به هم دلیل ظرفیت انبارها و میزان تقاضای مراکز توزیع به دو بخش محصولات و پسماندها تقسیم می‌شود. پسماندهای جمع‌آوری‌شده در سه رده کیفیت بالا، متوسط و پایین دسته بنده می‌شوند و برای هرکدام از دسته‌ها یک قیمت متفاوت پرداخته می‌شود درواقع برای پسماندهای بالا که دارای کیفیت بهتری نسبت به بقیه پسماندها هستند، قیمت بیشتر پرداخت می‌شود و به همین ترتیب برای پسماندهای متوسط قیمتی بیشتری به نسبت پسماندهای پایین پرداخت می‌شود. در این شبکه پس از خریداری پسماندها و انبار کردن آن‌ها در مراکز انبار، پسماندها بر اساس کیفیت آن‌ها به یکی از مراکز بازسازی، دمونتاژ و نوسازی ارسال می‌شود درواقع منطق دسته‌بندی پسماندها به این شکل است که پسماندهای که قابلیت نوسازی دارند در دسته کیفیت بالا قرار می‌گیرند و برای مراکز نوساز ارسال می‌شوند و همچنین پسماندهای که قابلیت بازسازی دارند در دسته کیفیت متوسط قرار می‌گیرند و برای مراکز بازسازی ارسال می‌شوند و سایر پسماندهای در رده کیفیت پایین قرار می‌گیرند و برای مراکز دمونتاژ ارسال می‌شوند. در مراکز بازسازی پسماندها تعمیر و همچنین برخی از قطعات و اجزای آن تعویض می‌شود به همین دلیل از تأمین‌کنندگان، جریان مواد اولیه وجود دارد. در مراکز دمونتاژ پسماندها دمونتاژ می‌شوند و قطعات قابل‌استفاده برای تولیدکننده و قطعات غیرقابل‌استفاده

برای بازیافت ارسال می‌شود بنابراین تولیدکننده می‌توانند مواد اولیه خود را از تأمین‌کنندگان و یا از مراکز دمونتاز تأمین کنند. در مراکز بازیافت قطعات بازیافت می‌شود. محصولات تولیدشده از قطعات بازسازی‌شده و یا قطعات نو، دارای کیفیت یکسان و قیمت یکسانی هستند. مدل بهینه‌سازی شامل تصمیمات مکان‌یابی، تعیین ظرفیت، تعیین تکنولوژی تولید، تخصیص تسهیلات است مدل به‌صورت چند دوره‌ای و با در نظر گرفتن محدودیت بودجه مدل‌سازی شده است

۱/۳- ضرورت پژوهش

در دنیای امروز یکی از دغدغه‌های بزرگ فعالان محیط‌زیست، مدیریت پایان عمر محصولات است ضرورت طراحی CLSC که بیشتر با دنیای واقعی هماهنگی دارد، دیده می‌شود [۲]. از مسائل مهم و حیاتی درباره مدیریت پایان عمر تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی، امکان تعمیر، بازسازی و استفاده مستقیم است که این امکان در سایر پسماندها ممکن نیست. در اکثر طراحی‌های انجام‌شده برای زنجیره تأمین حلقه بسته فعالیت‌های تعمیر، بازسازی و استفاده دوباره در نظر گرفته نشده است، که با در نظر گرفتن این فعالیت‌ها میزان دفع و بازیافت به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. با ایجاد هماهنگی میان دو جریان مستقیم و معکوس در زنجیره تأمین کالاها میزان بهره‌وری زنجیره تأمین افزایش می‌یابد. در مقالات ارائه‌شده میزان هماهنگی کمی میان دو جریان مستقیم و معکوس در نظر گرفته‌شده است. در طراحی شبکه CLSC و مکان‌یابی تسهیلات جمع‌آوری باهدف کمینه کردن هزینه و یا افزایش میزان سود بوده و یا درواقع با اهداف اقتصادی بوده است. یکی از مؤلفه‌های مهم در طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین مسئله زمان هست که در خیلی از کارهای که تا اکنون انجام‌شده، زمان در نظر گرفته نشده است.

دست‌آورد پژوهشی که قصد انجام داریم ارائه یک شبکه حلقه بسته برای توزیع و جمع‌آوری تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی و ارائه مدل ریاضی برای مکان‌یابی تسهیلات جمع‌آوری و حل مدل ارائه‌شده و

تحلیل پاسخ مدل حل شده که شامل مکان تسهیلات جمع‌آوری و میزان ظرفیت تخصیص داده شده به آن‌ها هست.

۱/۳/۱. هدف

با توجه به ضرورت بیان شده، هدف از انجام این پژوهش طراحی CLSC برای تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی با در نظر گرفتن دو معیار پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی هست. مدل ریاضی ارائه شده برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته شامل تصمیمات متعددی مکان‌یابی تسهیلات، تعیین ظرفیت تسهیلات، انتخاب تکنولوژی تولید، تخصیص جریان و انتخاب نوع حمل‌ونقل برای حالت‌های مختلف محصول است. مدل ریاضی به صورت چند دوره‌ای فرمول‌بندی شده است که هر یک از تصمیمات به صورت دوره‌ای اتخاذ می‌شوند علاوه بر این در مدل ریاضی محدودیت سرمایه‌گذاری ثابت، در هر دوره وجود دارد که مقدار اضافه بودجه با نرخ تنزیل به دوره بعد انتقال می‌یابد.

۱/۴ - تعاریف

در این بخش کلیدواژه‌های مهم تعریف می‌شوند.

۱/۴/۱. زنجیره تأمین

برای زنجیره تأمین تعریف مختلفی ارائه شده است که تعداد از آن‌ها ب قرار زیر است:

زنجیره تأمین شبکه‌ای متشکل از تمام اشخاص، سازمان، منابع، فعالیت‌ها و فناوری‌های است که در تولید محصولات، تحویل مواد اولیه از تأمین‌کنندگان به کارخانه برای تولید محصولات و در تحویل نهایی محصولات به مصرف‌کننده مشارکت دارند [۳].

زنجیره تأمین مجموعه‌ای از شرکت‌ها است که مواد را به جلو منتقل می‌کند. به طور معمول، چندین بنگاه مستقل در ساخت یک محصول و تحویل آن به مشتری در یک زنجیره تأمین شرکت می‌کنند

تولیدکنندگان مواد اولیه و قطعات، مونتاژ محصولات، عمده‌فروشان، بازرگانان خرده‌فروشی و شرکت‌های حمل‌ونقل همه اعضای یک زنجیره تأمین هستند [۴].

زنجیره تأمین همکاری شرکت‌ها برای رساندن محصولات و یا خدمات به بازار است. در این تعریف مصرف‌کننده نیز به‌عنوان بخشی از زنجیره تأمین شناخته می‌شود [۵].

زنجیره تأمین، شبکه‌ای از سازمان‌هایی است که از طریق ارتباط دادن بالادست (عرضه) و پایین‌دست (تقاضا)، در فرایندها و فعالیت‌های مختلفی که در قالب محصولات و خدمات ارائه‌شده به مصرف‌کننده نهایی، ارزش ایجاد می‌کنند [۶].

درمجموع می‌توان گفت که زنجیره تأمین مجموعه از افراد و یا سازمان‌ها هستند که با همکاری یکدیگر، باهدف تولید محصولات و یا ارائه خدمات، منابع و مواد اولیه را از عرضه‌کنندگان، با انجام یک سری از فعالیت‌ها به مشتریان انتقال می‌دهند.

۱/۴/۲. زنجیره تأمین معکوس

برای زنجیره تأمین معکوس همانند زنجیره تأمین تعریف‌های گوناگونی بیان‌شده است که اولین تعریف سنتی در سال ۱۹۹۲ در کتاب "زنجیره تأمین معکوس: کاغذ سفید" [۷] ارائه‌شده است در این تعریف زنجیره تأمین معکوس فرایند جمع‌آوری محصولات از مقصد نهایی خود و آماده‌سازی برای بهره‌برداری از ارزش و دفن آن‌ها بیان‌شده است. در دیدگاه سنتی زنجیره تأمین معکوس یک هزینه‌های اضافی و بدون هیچ ارزش شناخته‌شده است اما در طی یک دهه اخیر با افزایش فشارهای اجتماعی و نگرانی‌های زیست محیط زنجیره تأمین معکوس به‌عنوان یک موضوع مهم در مدیریت زنجیره تأمین شناخته می‌شود.

طبق گزارش شورای اجرایی زنجیره تأمین آمریکا، زنجیره تأمین معکوس به‌عنوان «فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان کارآمد و مقرون‌به‌صرفه مواد اولیه، موجودی فرآیند، کالاهای آماده و اطلاعات

مرتبط از نقطه مصرف به نقطه منشأ برای به دست آوردن ارزش یا دفع مناسب است» [۸] همان طور که از تعریف هم برمیاید زنجیره تأمین معکوس و زنجیره تأمین دارای تفاوت های عمده ای هستند که در جدول ۱ برخی از این تفاوت ها به صورت مختصر بیان شده است.

جدول ۱: تفاوت زنجیره تأمین و زنجیره تأمین معکوس [۹]

#	زنجیره تأمین	زنجیره تأمین معکوس
۱	کیفیت	کیفیت متفاوت محصولات
۲	مقدار	مقدار زیاد محصولات استاندارد
۳	ارزش کالا	دارای کیفیت متوسط
۴	دوره عمر محصول	قابل مدیریت
۵	جریان محصولات	یک جریان (فشاری)
۶	قیمت	دو جریان (فشاری و کششی)
۷	زمان سفارش	قیمت یکسان محصولات
۸	مسیریابی	محصولات دارای قیمت های متفاوت
۹	ردیابی اطلاعات	زمان متوسط تا طولانی سفارش
۱۰	مدیریت موجودی	مسیریابی روشن محصولات
۱۱	کنترل موجودی	مسیریابی مبهم محصولات
۱۲	بازیابی سرمایه	ترکیبی از سیستم های خودکار و دستی
۱۳	هزینه	مدیریت موجودی ناسازگار
۱۴	نوع مشتریان	متمركز
	آسان محصولات	غیرمتمركز
	دشوار محصولات	شناسایی راحت مشتریان و بازاریابی
		شناسایی مشکل مشتریان و بازاریابی

اولویت ۱۵	اولویت بالا	اولویت پایین
۱۶ فرایندها	فرایندهای مشخص	فرایندهای نامشخص
۱۷ مدیریت مالی	مدیریت مالی مشخص	مدیریت مالی نامشخص
۱۸ مذاکره	مذاکره ساده بین طرفین	مذاکرات دشوار بین طرفی
۱۹ کانال	کانال‌های ساده	کانال‌های پیچیده

۱/۴/۳. زنجیره تأمین حلقه بسته

زنجیره تأمین حلقه بسته درواقع به ایجاد هماهنگی بین دو جریان زنجیره تأمین مستقیم که به فعالیت‌های تأمین مواد اولیه، تولید، توزیع و فروش می‌پردازد و زنجیره تأمین معکوس که به فعالیت‌های جمع‌آوری، دسته‌بندی، بازیافت، تعمیر و دفع می‌پردازد، گفته می‌شود [۱۰].

۱/۴/۴. پسماندهای تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی

طبق دستورالعمل‌های مجلس و شورای اروپا، WEEE به پسماندهای تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی گفته می‌شود منظور از تجهیزات الکتریکی، کلیه وسایلی که با الکتریسیته کار می‌کنند از جمله یخچال‌ها، اتوها ... هست و منظور از تجهیزات الکترونیکی، کلیه وسایلی که در ساخت آن‌ها از مدارهای الکترونیک استفاده شده است از جمله تلفن‌های همراه، لپ‌تاپ‌ها و ... هست.

WEEE ترکیبی پیچیده از مواد است که به دلیل محتوای خطرناک آن‌ها اگر به‌درستی مدیریت نشوند، می‌توانند مشکلات عمده محیطی و بهداشتی را ایجاد کنند. افزون بر این تولید قطعات الکترونیکی نیازمند مواد منابع کم یاب و گران‌بها است (به‌عنوان مثال حدود ۱۰ درصد کل طلا در سراسر جهان برای تولید آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد). بهبود مدیریت زیست‌محیطی WEEE و کمک به یک

اقتصاد مدور و افزایش بهره‌وری منابع، بهبود جمع‌آوری، درمان و بازیافت الکترونیک در پایان زندگی آن‌ها ضروری است.

۱/۴/۵. توسعه پایدار

توسعه پایدار مفهومی است که به‌تناوب در محافل علمی مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای آن تعریف مختلفی ارائه شده است اما یکی از آن‌ها که بیشتر از همه رایج است، تعریفی است که در گزارش کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه (WCED^۱) در سال ۱۹۸۷ با عنوان آینده "مشترک ما"^۲ آمده است "توسعه پایدار، توسعه‌ای است که نیازهای امروز را بدون به خطر افتادن توانایی نسل‌های آینده برای تأمین نیازهایشان، برآورده می‌سازد." بر اساس این تعریف، توسعه پایدار چارچوبی را فراهم می‌کند که در آن سیاست‌های محیط‌زیستی و استراتژی‌های توسعه با یکدیگر پیوستگی پیدا می‌کنند و در سایه آن فرآیند پیشرفت اقتصادی در حالی انجام می‌شود که ارزش درازمدت محیط‌زیست نیز حفاظت می‌گردد.

۱/۴/۶. پایان عمر محصول

مدیریت پایان عمر محصولات به‌عنوان آخرین فاز در دوره عمر محصول، از اهمیت زیادی ازلحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی برخوردار است زیرا از طرفی ممکن است محصولات از پتانسیل بالایی برای آلودگی محیط‌زیست برخوردار باشند و یا اینکه محصول از مواد غیرقابل بازیافت تشکیل شده باشد [۳]. گزینه‌های مختلف برخورد با محصولات و اجزای آن‌ها در فاز پایان عمر وجود دارد که عبارت‌اند از: استفاده مجدد^۳، بازسازی^۴، دمونتاژ^۵ و دفن کردن^۶

^۱ World Commission on Environment and Development

^۲ Our Common Future

^۳ Reuse

^۴ Remanufacture

^۵ Material Recycling

^۶ Landfill

۱/۴/۷. اثر گلخانه‌ای^۱

گازهای گلخانه‌ای، گازهای هستند که تا حد زیادی نسبت به تابش مرئی که از خورشید به زمین می‌رسد شفاف است اما تابش مادون قرمز حرارتی را که از سطح زمین تابش می‌کند جذب می‌کند [۱۱]. انرژی جذب شده در جو از هر جهت دوباره گرم می‌شود و سطح زمین را گرم می‌کند. گازهای گلخانه‌ای H_2O و CO_2 به طور طبیعی در جو به وجود می‌آیند و دمای سطح زمین را تقریباً ۳۳ درجه سانتی گراد گرم نگه میدارند. فعالیت‌های انسانی، مانند سوزاندن سوخت‌های فسیلی، باعث تولید مازاد گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر و تشدید اثر گلخانه‌ای می‌شود. به گازهای H_2O ، CO_2 ، N_2O ، ازن، کلرو فلوروکربن‌ها و SF_6 گازهای گلخانه‌ای می‌گویند. گازهای گلخانه‌ای، مولکول‌های سه یا چند اتم در اتمسفر هستند که اتم‌های موجود در آن‌ها ارتعاش می‌کنند و در فضا می‌چرخند. با جذب اشعه مادون قرمز بین سطوح مختلف انرژی جابه‌جا می‌شوند. فوریه با توصیف (در سال ۱۸۲۷) چگونگی کنترل دمای سطح زمین با اختلاف جذب اشعه مرئی و مادون قرمز کنترل می‌شود، استفاده از عبارت "اثر گلخانه‌ای" برای توصیف این پدیده در حدود سال ۱۹۵۰ به وجود آمده است [۱۱].

۱/۴/۸. انتشار کربن

انتشار کربن، به راه‌سازی کربن در جو گفته می‌شود و هنگامی که در مورد انتشار کربن حرف زده می‌شود صرفاً صحبت از انتشار گازهای گلخانه‌ای است که عامل اصلی تغییر آب‌وهوا است. از آنجاکه انتشار گازهای گلخانه‌ای اغلب معادل دی‌اکسید کربن محاسبه می‌شود، هنگام بحث در مورد گرم شدن کره زمین یا اثر گلخانه‌ها، معمولاً به "انتشار کربن" گفته می‌شود. از زمان انقلاب صنعتی، سوختن

^۱ Carbon Footprint

سوخت‌های فسیلی افزایش یافته است، که به‌طور مستقیم با افزایش سطح دی‌اکسید کربن در جو ما و در نتیجه افزایش سریع گرم شدن کره زمین ارتباط دارد.

۱/۴/۹. مالیات انتشار کربن

مالیات انتشار کربن، مالیات بر انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) است که هدف از پرداخت آن داخلی سازی بیرونی‌های^۱ مرتبط با تغییرات آب‌وهوایی است. منظور از داخلی سازی بیرونی‌های انتقال بار مسئولیت و یا هزینه‌های تأثیرات بیرونی مانند انتشار آلودگی از بیرون به داخل است [۱۲] این امر می‌تواند از طریق مالیات، حقوق مالکیت، عوارض و یارانه دولت انجام شود. بدون مالیات کربن، هزینه‌ها تولید واقعی نیست‌اند زیرا هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای را به دیگران، از جمله نسل‌های آینده، تحمیل می‌شود. این مالیات افراد را مجبور می‌کند تا پیامدهای ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای را در نظر بگیرند. مالیات کربن نمونه‌ای از مالیات پیگووی^۲ است این نوع مالیات هزینه‌ای است که دولت بابت فعالیت‌های که موجب آسیب‌های اجتماعی خارجی می‌شود اخذ می‌کند.

۱/۵- فرضیات و سؤالات پژوهش

تعاریف متفاوتی برای فرضیات پژوهش، ارائه شده است که بهترین آن تعریف ارائه شده در کتاب فرهنگ علوم رفتاری شعاری‌نژاد است:

"فرضیه، به فرضی گفته می‌شود که به‌عنوان یک توضیح قابل آزمایش مطرح می‌شود. معمولاً تشکیل یک فرضیه، نخستین گام در حل مسئله و شرح یک پدیده است."

^۱ Internalizing Externalities

^۲ Pigouvian Tax

فرضیاتی که در این پژوهش در نظر گرفته شده است عبارت‌اند از:

- ۱- در نظر گرفتن بعد زیست‌محیطی پایداری در مکان‌یابی تسهیلات شبکه تأثیرگذار نیست.
- در این پژوهش دو بعد پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است فرض می‌شود که بعد زیست‌محیطی مسئله تأثیری در مکان‌یابی تسهیلات ندارد و یا درواقع مکان تسهیلات با در نظر گرفتن و یا نگرفتن این بعد اتفاقی نخواهد داشت. در نظر گرفتن این مسئله تنها باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود.
- ۲- با افزایش مالیات بر انتشار کربن، کل هزینه‌ها با شدت کم‌تر افزایش می‌یابد.
- یکی از تصمیمات مهم که باید توسط سازمان‌های نظارتی اخذ شود نحوه محاسبه مالیات انتشار کربن و به‌علاوه نرخ مالیات انتشار کربن است. در این پژوهش فرض می‌شود که با افزایش نرخ مالیات هزینه‌های تحمیل‌شده به تولیدکننده‌ها با شدت کمتری افزایش می‌یابد و به‌علاوه تفاوت زیادی بین روش‌های محاسبه مالیات وجود ندارد.
- ۳- مدل ریاضی با ابعاد متوسط با استفاده از کتابخانه CPLEX قابل است و برای حل مدل نیازی به استفاده از الگوریتم‌های تجزیه نیست.
- برای حل مدل ارائه‌شده در این پژوهش از کتابخانه CPLEX استفاده شده است فرض می‌شود که این کتابخانه توانایی حل مدل را در زمان معقول دارد در صورت عدم توانایی کتابخانه لازم است که از روش‌ها تجزیه استفاده شود.
- هر پژوهش جهت پاسخ گوی به یک سری سؤالات انجام می‌شوند این سؤالات با عنوان سؤالات پژوهش معرف هستند حال سؤالاتی که در این پژوهش قصد پاسخ گوی به آن را داریم به‌قرار زیر هستند:
- ۱- برای توزیع تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی همچنین جمع‌آوری و بازیافت پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی، چه شبکه زنجیره تأمین موردنیاز است؟
- ۲- مکان و جریان بین تسهیلات شبکه طراحی شده چگونه است؟

۳- ارتباط بین روش محاسبه مالیات انتشار کربن و نرخ مالیات انتشار کربن با طراحی شبکه چگونه است؟

۴- با افزایش نرخ مالیات انتشار کربن چه میزان هزینه‌های زنجیره تأمین افزایش میابد؟

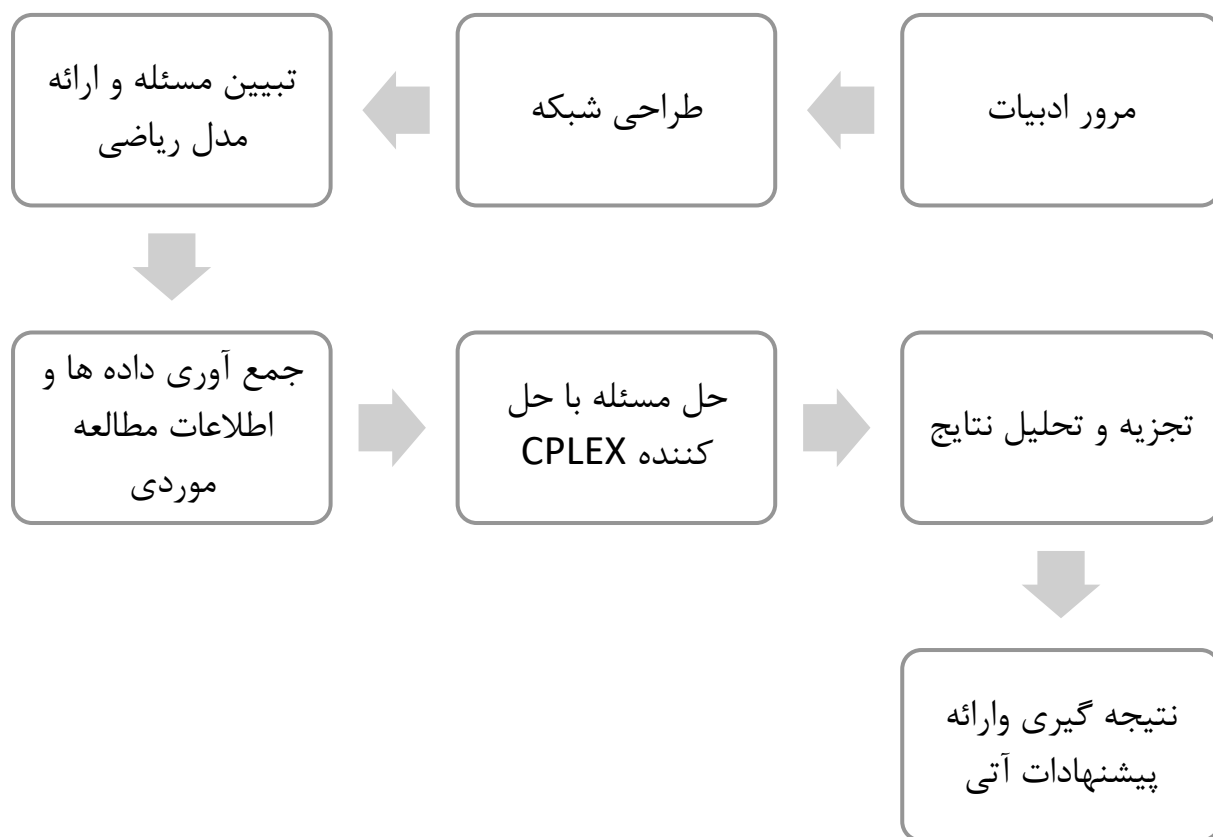
۵- روش‌های مختلف محاسبه مالیات انتشار کربن و میزان هزینه آن برای زنجیره تأمین چقدر است؟

۱/۶- روش تحقیق

به تمامی روش‌ها و تکنیک‌هایی که محقق برای انجام پژوهش در مطالعه مسئله بکار می‌گیرد، روش‌های تحقیق گفته می‌شود.

۱/۶/۱. روش و ابزار گردآوری اطلاعات

روش تحقیق مورد استفاده برای مرور ادبیات پیشین در این تحقیق روش کتابخانه است که برای این کار از منابع معتبر انتشار مقالات استفاده شده است. به علاوه سناریو انجام پژوهش در نمودار "شکل ۱" نمایش داده شده است.



شکل ۱: سناریو انجام پژوهش

۱/۶/۲. قلمرو تحقیق

قلمرو تحقیق یکی از موضوعات مهم در هر پژوهش است که باید نشان دهد پژوهش چه حوزه‌ای را پوشش می‌دهد از طریق قلمرو پژوهش می‌توان فهمید که تحقیق به هدف خود رسید است. به همین دلیل قلمرو پژوهش بخشی است در نگارش آن باید دقت شود. قلمرو زمانی پژوهش در مرور ادبیات از تاریخ ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ است و اما قلمرو مکانی برای مطالعه موردی ایران در نظر گرفته شده است.

۱/۷- نمایی کلی پژوهش

این پژوهش شامل ۵ فصل است که در ادامه خلاصه هر یک از فصل بیان می‌شود.

- فصل ۱: کلیات

بیان مسئله یکی از بخش‌های اصلی هر پژوهشی است مسئله پژوهش حاضر طراحی زنجیره تامین حلقه بسته است که هدف آن مدیریت پایان عمر محصولات الکتریکی و الکترونیکی است در طراحی این زنجیره تامین دو فاکتور پایداری اقتصادی و زیست محیطی در نظر گرفته شده است. با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست محیطی، بازیافت پسماندها امری ضروری محسوب می‌شود.

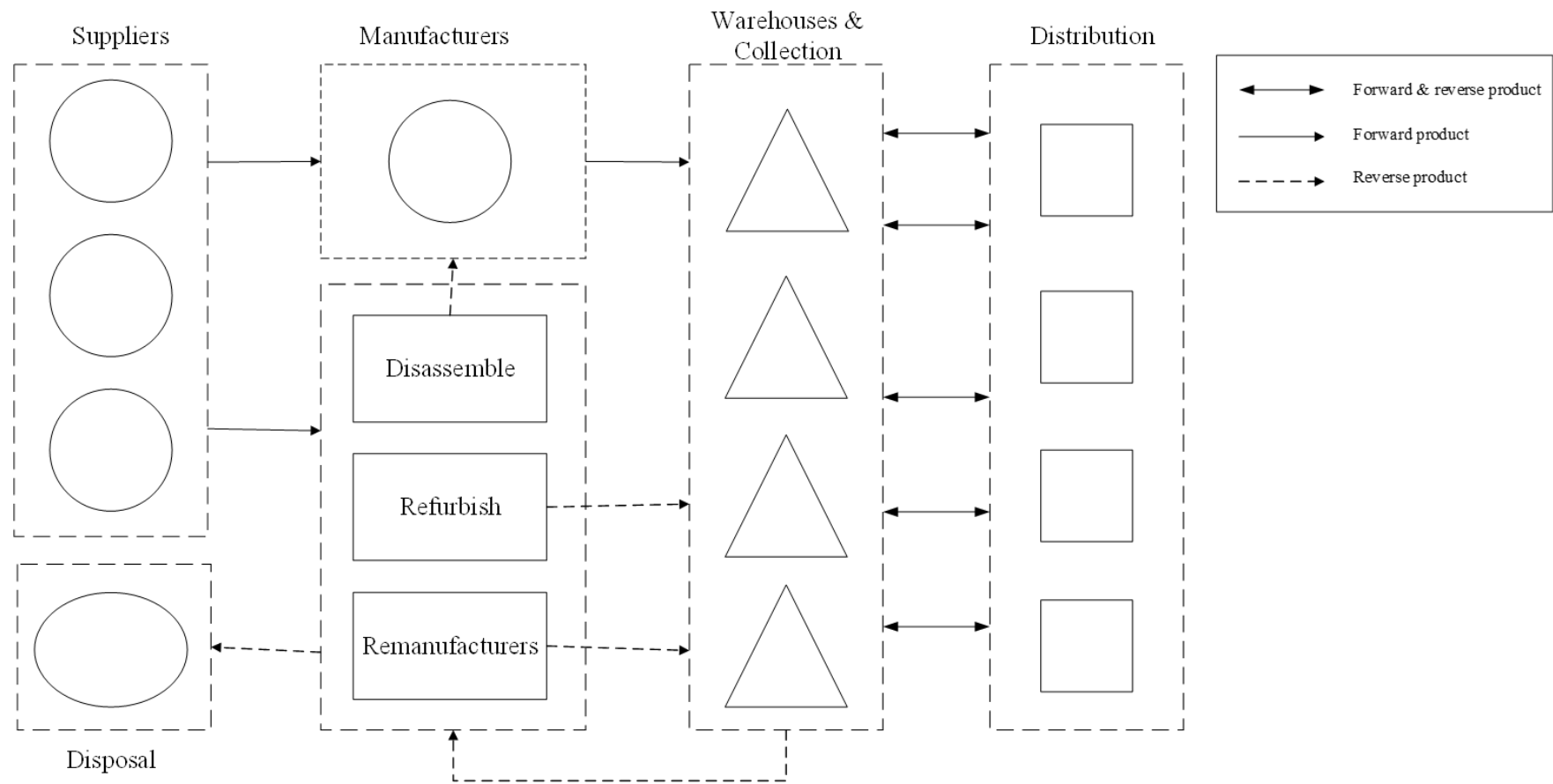
- فصل ۲: مرور ادبیات

در این بخش به مرور ادبیات و بررسی پژوهش‌های انجام شده پرداخته می‌شود در اولین قدم ادبیات حوزه مطالعات مدیریت زنجیره تامین پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی طبقه بندی می‌شود سپس شکاف تحقیقاتی تعیین و جایگاه پژوهش حاضر تعیین می‌شود.

- فصل ۳: مدل روش تحقیق

- فصل ۴: روش حل

- فصل ۵: نتیجه‌گیری و جمع‌بندی



شکل ۲: نمودار جریان مواد در شبکه

۲. فصل دوم: مرور ادبیات

در این فصل پیشینه پژوهش موردبررسی قرار می‌گیرد. بیان پیشینه تحقیق یکی از بخش‌های ضروری برای هر تحقیقی ازجمله پژوهش پیش رو است. درواقع بر اساس مرور ادبیات جامعی که انجام می‌شود، شکاف‌های تحقیقاتی مشخص می‌شود و بر اساس آن می‌توان مسئله را معرفی کرد. همچنین مرور مطالعات انجام‌گرفته، روند توسعه و تکامل موضوع و نیز گرایش‌ها مختلف تحقیقاتی که در برهه‌های زمانی مختلف وجود داشته‌اند، را نشان می‌دهد.

۲/۱- طبقه‌بندی مطالعات مدیریت زنجیره تأمین پسماندهای الکتریکی و

الکترونیکی

حوزه مطالعاتی مدیریت زنجیره تأمین WEEE را می‌توان به ۴ دسته‌ای اصلی، ۱- طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین، ۲- تصمیم‌گیری و ارزیابی عملکرد، ۳- تحلیل چارچوب مفهومی مطالعات و ۴- مطالعات کیفی دسته‌بندی کرد [۳].

حوزه طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین به طراحی شبکه، مکان‌یابی، تخصیص جریان، انتخاب تکنولوژی تولید و می‌پردازد در حالت کلی می‌توان گفت در این حوزه تحقیقاتی بیشتر به مسئله نحوه جمع‌آوری و دستیابی به پسماندها پرداخته می‌شود. به‌عنوان مثال: 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^۱ و همکاران [۱۳] برای اجرای کردن دستورالعمل اروپا WEEE، به ارائه مدل ریاضی MILP^۲ برای طراحی شبکه معکوس پرداخته‌اند هدف مدل ریاضی مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری و مراکز دسته‌بندی است. همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌کنید مطالعات این حوزه را می‌توان به ۴ دسته‌ای ۱- زنجیره تأمین حلقه بسته ۲- زنجیره تأمین حلقه باز

^۱ MI Gomes

^۲ Mixed integer linear programming

۳- لجستیک مشارکتی و ۴- مسیریابی وسیله نقلیه دسته‌بندی کرد که پژوهش حاضر در دسته زنجیره تأمین حلقه بسته قرار می‌گیرد.

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 متمرکز شده است. به‌عنوان نمونه تمور و همکاران [۱۴] در مقاله‌ای تحت عنوان "انتخاب مکان تسهیلات در لجستیک معکوس با استفاده روش تصمیم‌گیری فازی نوع ۲" به ارائه یک رویکرد چند معیار برای انتخاب مناسب‌ترین مکان تسهیلات لجستیک معکوس با استفاده از روش تاپسیس^۱ فازی نوع دوم پرداخته‌اند.

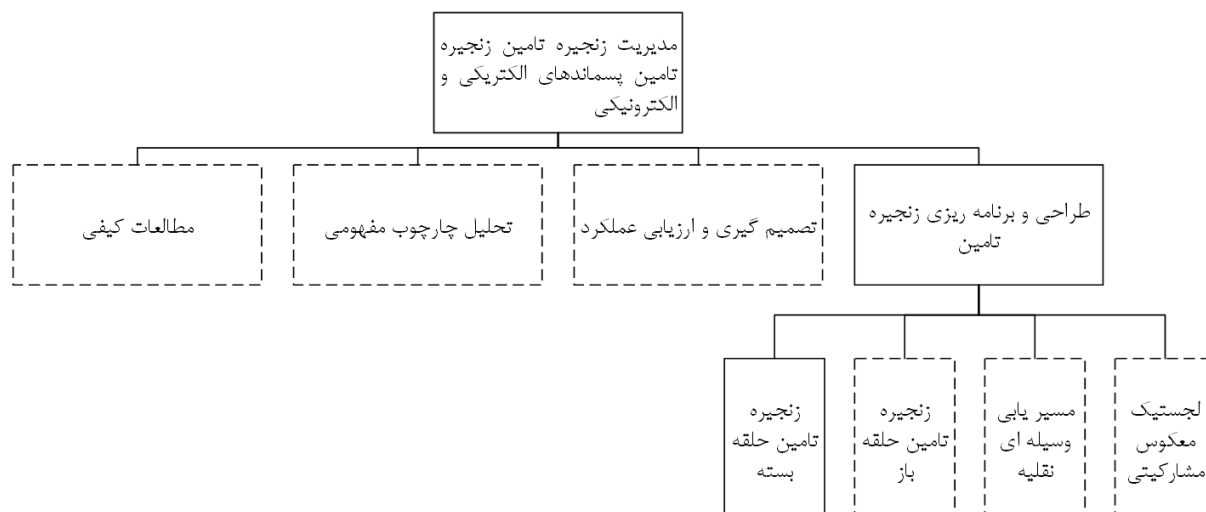
در چارچوب مفهومی سیستم مفاهیم، فرضیات، انتظارات، اعتقادات و نظریه‌های پژوهش طراحی می‌شود و همان‌طور که میلز و هوبرمن (۱۹۹۴) تعریف کرده‌اند چارچوب مفهومی یک محصول بصری و یا نوشتاری است که موضوع اصلی مطالعه، فرضیات و رابطه بین آن‌ها را توضیح می‌دهد. با توجه به این که مطالعه زنجیره تأمین پسماندهای الکتریکی 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^۲ و همکاران [۱۵] 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" [۱۰] است که با بررسی ۳۸۲ مقاله منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا

^۱ TOPSIS

^۲ Verônica Ghisolfi

۲۰۱۳ به طبقه‌بندی حوزه‌های تحقیقاتی لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته و تشریح آینده تحقیقات پرداخته است.



شکل ۳: چارچوب ادبیات حوزه مدیریت زنجیره تأمین پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی

۲/۲- زنجیره تأمین معکوس

لجستیک معکوس از آن دسته اصطلاحات است که برای آن تعریف‌های مختلفی ارائه شده است تعریف استاک [۱۶] یکی از کامل ترین تعریف‌های ارائه شده است "لجستیک معکوس به مجموعه فعالیت‌های بازسازی، دفع پسماند و مدیریت پسماندهای خطرناک گفته میشود و به عبارت وسیع تر به کلیه فعالیت‌های که در زنجیره تأمین جهت کاهش منابع، بازسازی منابع، استفاده دوباره از منابع و دفع پسماندها انجام می‌شود زنجیره تأمین معکوس گرفته می‌شود".

شکری و علی‌رضایی [۱۷] 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 گرفته شده 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 به اندازه ظرفیت شبکه و یا بیشتر موجود است).

یکی از بخش‌های که در طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس می‌تواند در نظر گرفت بخش دمونتاز^۱ است در این بخش، پسماندهای بازگشتی دمونتاز شده و قسمت‌های قابل استفاده برای بازسازی ارسال و قسمت‌های غیرقابل استفاده برای دفن می‌شوند. در شبکه زنجیره تأمین معکوس طراحی شده توسط کینگ و ژاو [۱۸] بخشی تحت عنوان آزمون در نظر گرفته شده است با همان مفهوم دمونتاز 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 ارائه شده در این مقاله، یک مدل ریاضی تک دوره‌ای و تک محصولی است که با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استوار، مدل حل شده است به علاوه هدف مدل بهینه‌سازی جریان شبکه و تعداد آزمایش‌های انجام شده در بخش آزمون است.

میزان محصولات بازسازی شده 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 به صورت نرخ ثابت در نظر گرفته شده است به عنوان مثال یو و سولوانگ [۱۹] در مقاله‌ای تحت عنوان "برنامه‌ریزی تصادفی با رویکرد بهبود معیارهای کلیدی روش مبتنی بر سناریو^۲ برای طراحی زنجیره تأمین معکوس پایدار WEEE" به مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری و طرح‌های بازسازی و بهینه‌سازی جریان بین تسهیلات پرداخته است. در مدل ارائه شده میزان محصولات و مواد بازسازی شده از پسماند یک نرخ ثابت است به علاوه پارامترهای قیمت محصولات بازسازی شده و مواد بازسازی شده تصادفی در نظر گرفته شده است. آیه‌زا و همکاران [۲۰] 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^۱، مرکز دسته‌بندی^۲، مرکز بازیافت^۳، مرکز پالایش^۴، 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 ۰.۸ و ۰.۹ تخمین زده‌شده است علاوه بر این پارامتر، مقدار پسماندها و هزینه حمل‌ونقل نیز به‌صورت تصادفی در نظر گرفته‌شده است.

کیلیک و همکاران [۲۱] 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، ۴ گروه پسماند لوازم‌خانگی بزرگ، فریزر و خنک‌سازها، تلویزیون و لوازم‌خانگی کوچک در نظر گرفته‌شده است که برای هر یک از ۴ گروه پسماند یک نرخ بازیافت^۵ مختلف برآورد شده است. در مطالعه موردی مدل ریاضی برای ۱۰ سناریو مختلف درباره میزان جمع‌آوری پسماندها حل شده است.

البادویی و همکاران [۲۲] شبکه زنجیره تأمین معکوس E-Waste شامل ۷ 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

collecting centers^۱

sorting centers^۲

recycling centers^۳

refinery centers^۴

Recovery^۵

توجه به کوچک بودن حجم مسئله، بررسی مزیت استفاده از روش‌های غیردقیق برای حل مدل لازم است چون که 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 تصویب شده است. تاری و آلومور [۲۳] در راستای اجرای کردن قانون مسئولیت تولیدکننده در ترکیه به پیکربندی شبکه زنجیره تأمین معکوس پرداخته‌اند هدف این مقاله مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری در یک شبکه ۲ سطحی که شامل مناطق تولید، مراکز جمع‌آوری و شرکت‌ها است. در تابع هدف مدل ارائه‌شده برای پیکربندی شبکه ۳ 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 تقسیم شده است. در این مدل قیمت خرید پسماندها در نظر گرفته نشده است.

سیبل الومور و همکاران [۲۴] به ارائه زنجیره تأمین معکوس چند دوره‌^۱ چند محصول 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 پرداخته شده است. ظرفیت مراکز به صورت مودولار^۱ در نظر گرفته شده است که هر یک از مراکز در ابتدا با یک ظرفیت اولیه راه‌اندازی می‌شوند و در طول دوره برنامه‌ریزی ظرفیت مراکز افزایش می‌یابد. در این پژوهش فرض شده است که کل پسماندهای جمع‌آوری شده قابلیت بازسازی را دارند که فرض یک فرض غیرواقعی است علاوه بر این فرض شده است که یک سازمان مسئولیت راه‌اندازی و بهره‌برداری شبکه

^۱ modular

معکوس را دارد و درآمد این سازمان از فروش محصولات بازسازی شده به سایر شرکتها حاصل می شود. مدل ریاضی ارائه شده برای مطالعه موردی آلمان پیاده شده است.

۲/۳- زنجیره تأمین حلقه بسته

زنجیره تأمین حلقه بسته^۱ (CLSC) اشاره به تلفیق و یکپارچه سازی فعالیت های زنجیره تأمین پیشرو^۲ (تأمین مواد اولیه، تولید، انبار، توزیع و خرده فروشی) و زنجیره تأمین معکوس (جمع آوری، مرتب سازی، بازسازی، استفاده دوباره و) دارد.

چین و همکاران [۲۵] یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای بازیافت کارتریج در چین ارائه داده اند در این شبکه ۴ شریک تأمین کننده، تولید کننده، انبار و توزیع کننده در زنجیره تأمین پیشرو و ۴ شریک مناطق مشتریان، مراکز جمع آوری، مراکز بازیافت و طرح های دفن در زنجیره تأمین معکوس در نظر گرفته شده است. در این شبکه پسماندها در مراکز بازیافت بر اساس کیفیت به دودسته خوب و بد تقسیم می شود که پسماندهای باکیفیت خوب بازسازی و به همراه محصولات نو به مشتریان فروخته می شود و پسماندهای با کیفیت بد، دمونتاز و بخش قابل استفاده در تولید محصولات نو مورد استفاده قرار می گیرد و بخشهای غیر قابل استفاده برای دفن ارسال می شود. در مدل ریاضی ارائه شده برای این شبکه قیمت خرید محصولات باکیفیت های مختلف یکسان در بدین ترتیب تولید کنندگان می توانند مواد اولیه مورد نیاز خود را از تأمین کنندگان مواد اولیه و یا مواد اولیه بازیافت شده تأمین کنند. گرفته شده است به عنوان مثال قیمت خرید کارتریج باکیفیت خوب که

^۱ Closed loop supply chain

^۲ forward logistics

قابلیت تعمیر و استفاده دوباره از آن وجود دارد با کارتریج کیفیت بد که قابلیت تعمیر و استفاده دوباره از آن وجود ندارد یکسان در نظر گرفته شده است همچنین قیمت فروش محصولات بازسازی شده و محصولات نو نیز یکسان است. در مدل ریاضی میزان بازگشت محصولات به زنجیره تأمین به عنوان پسماند به ازای هر منطقه یک نرخ ثابت تعریف شده است. برای بهینه سازی مدل تنها بعد اقتصادی مسئله در نظر گرفته شده است.

امین و ژانگ [۲۶] یک مدل ۳ سطحی برای پیکربندی زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت پیشنهاد کرده اند. در شبکه طراحی شده پسماندهای مازاد بر ظرفیت زنجیره تأمین معکوس شبکه، به کارخانه های بازسازی برون سپار می شود. در سطح یک مدل پیشنهادی میزان تولید، میزان بازسازی و میزان برون سپاری شبکه تعیین می شود برای این کار یک مدل تک دوره ای برنامه ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح غیرخطی (MINLP) ارائه داده اند که برای بهینه سازی این مدل تنها بعد اقتصادی (هزینه های راه اندازی، عملیات و درآمدهای حاصل فروش محصولات) لحاظ شده است در هزینه ها هزینه خرید پسماندها لحاظ نشده است. در سطح دوم مدل تأمین کننده ها، کارخانه های بازسازی قراردادی و سایت های بازسازی ارزیابی می شوند برای این کار از مدل گسترش عملکرد کیفیت^۱ (QFD) فازی استفاده شده است در سطح سوم این مدل مسئله ای انتخاب و تخصیص تأمین کننده، پیمانکاران بازسازی و سایت های بازسازی حل می شود. برای این کار یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح خطی (MILP) ارائه شده است.

در طراحی و بهینه سازی زنجیره تأمین ۲ نوع گرایش تصمیم گیری متمرکز و غیرمتمرکز وجود دارد که در تصمیم گیر متمرکز فرض بر این است که تمام تصمیمات به صورت متمرکز گرفته می شود اما در تصمیم گیری غیرمتمرکز فرض می شود هر یک از بخش های زنجیره تأمین به صورت جداگانه بر اساس اهداف خود تصمیم می گیرند کیانگ کیانگ [۲۷] به طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته با تصمیمات غیرمتمرکز پرداخته اند شبکه ارائه شده، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ۳ سطحی که شامل تأمین کننده، تولیدکننده و خرده فروشی است که مشتریان محصولات بازگشتی را به خرده فروشان می فروشند. در مدل ریاضی فرض شده است مشتریان

^۱ Quality function deployment

در قبال محصولات جدید و محصولات تولیدشده از مواد اولیه بازیافتی بی تفاوت عمل می کنند و برای آنها دارای ارزش یکسانی است در مل ارائه شده مقدار تقاضا به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است. در مدل ریاضی ارائه شده برای بهینه سازی میزان تولید تولیدکننده میزان سود تولیدکننده برابر درآمد حاصل از فروش محصولات منهای هزینه های تولید و خرید مواد اولیه و پسماندهای و هزینه های تولید در نظر گرفته شده است بخش از پسماندها قابلیت استفاده را دارند و مابقی پسماندها غیرقابل استفاده هستند تفکیک بخش های قابل استفاده پسماندها دارای هزینه ای است که در مدل ریاضی در نظر گرفته نشده است. مقدار تقاضا به صورت تابعی از قیمت محصولات در نظر گرفته شده که تابع توزیع مقادیر تقاضا برای قیمت ها مختلف تخمین زده شده است. برای حل مدل ریاضی مثال عددی بیان شده است.

جدول ۲: خلاصه مطالعات بررسی شده

موضوع	سال	مدل	روش حل	مطالعه موردی [‡]	ابعاد پایداری			چند دوره‌ای	ارزش زمانی پول	محدودیت بودجه	تصادفی	کیفت پسماند
					En [‡]	So [‡]	Ec ^۱					
طراحی شبکه معکوس WEEE [۱۷]	۲۰۱۷	MILP	GA	Iran	Carbon tax	+	+	Static	-	-	-	-
طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس برای WEEE تحت عدم قطعیت [۱۸]	۲۰۱۶	MILP	Robust optimization	chain	-	-	+	Static	-	-	quantity of recycled, reused and disposed	-
برنامه‌ریزی تصادفی با رویکرد بهبود معیارهای کلیدی روش مبتنی بر سناریو برای طراحی زنجیره تأمین معکوس پایدار [۱۹] WEEE	۲۰۱۶	MILP	Scenario-Based	-	Carbon offset	-	+	Static	-	-	amount of WEEE price	-

Economic^۱
 Social[‡]
 environment[‡]

	amount WEEE											طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس
-	quality WEEE transportation costs	-	-	Static	-	-	+	Turkey	Sample average approximation	MILP	۲۰۱۵	تصادفی برای [۲۰] WEEE
-	-	-	-	Static	-	-	+	Turkey	Scenario-Based	MILP	۲۰۱۵	طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس برای WEEE در ترکیه [۲۱]
-	-	-	-	Static	-	-	+	Egypt	GA	MILP	۲۰۱۵	بهینه‌سازی زنجیره تأمین e-waste [۲۲]
+	-	-	-	Static	-	-	+	Chain	GA	IP	۲۰۱۵	یکپارچه‌سازی زنجیره‌تأمین حلقه بسته با مسئله تخصیص و تصمیمات باز یافت محصولات [۲۵]
-	demand	-	-	Static	-	-	+	-	expect value	MILP	۲۰۱۳	مدل ۳ سطحی برای پیکربندی زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت [۲۶]
-	-	-	-	Multi	-	-	+	Turkey		MIP	۲۱۰۴	مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری در شبکه RL برای WEEE [۲۳]

زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر									
گرفتن رقابت و سرمایه‌گذاری در									
کانال‌های توزیع در شرایط عدم									
قطعییت [۲۷]									
طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس									
چند دوره‌ای [۲۴]									
-	Price & demand	+	-	Static	-	-	+	-	Mathematical modeling
-		-	-	Multi	-	-	+	Germany	MILP

۲/۴- بررسی شکاف تحقیقاتی و جایگاه تحقیق

مرور ادبیات مطالعات و پژوهش‌های که در جهت مدیریت پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی انجام شده است نشان می‌دهد که فارغ از مدل‌های ریاضی ارائه شده و رویکردی که برای حل مدل در نظر گرفته شده است، در شبکه طراحی شده تسهیلات نوسازی در نظر گرفته نشده است. خلاصه مطالعات بررسی شده در جدول ۲ نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌کنید در میان پژوهش‌های انجام شده هیچ کدام محدودیت بودجه برای سرمایه‌گذاری ثابت را در نظر نگرفته‌اند به علاوه تعداد کمی از آن‌ها ۳ بعد اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی را به صورت هم‌زمان در نظر گرفته‌اند همچنین جای خالی موضوع کیفیت پسمانده و ارزش زمانی پول نیز در میان پژوهش‌ها احساس می‌شود.

جدول ۳ خلاصه‌ای تحقیقات انجام شده است به کمک این جدول می‌توان شکاف تحقیقاتی را مشخص کرد به علاوه تفاوت پژوهش حاضر با پژوهش‌های انجام شده را بررسی کرد در ستون دوم این جدول مرجع تحقیقات را نشان می‌دهد. ستون سوم جدول متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد همان‌طور که مشخص است در تحقیقات انجام شده در این حوزه تا به اکنون اکثراً تصمیمات مکان‌یابی و تخصیص و تنها در پژوهش ردیف ۱۱ از تحقیقات تعیین ظرفیت موردبررسی قرار گرفته است در پژوهش حاضر علاوه بر مکان‌یابی و تخصیص، انتخاب تکنولوژی تولید در واحدهای تولیدی و انتخاب وسیله‌های حمل و نقل نیز در نظر گرفته شده است. ستون چهارم ابعاد پایداری را نشان می‌دهد در اکثر تحقیقات تنها بعد اقتصاد دیده شده است به جز پژوهش شکوری و همکاران [۱۷] که هر سه بعد پایداری در نظر گرفته شده است. روش محاسبه بعد زیست محیطی، نرخ ثابت مالیات است اما در ایران روشی شبیه به روش پلکانی [۲۸] مورد استفاده قرار می‌گیرد که تا سقف حد مجاز بدون مالیات و بیشتر از آن مالیات محاسبه می‌شود. ستون ۵ ویژگی‌های مدل ریاضی را نشان می‌دهد که عبارت‌اند از دوره برنامه‌ریزی، پارامترهای تصادفی، تابع هدف مدل ریاضی، تعداد محصولات، بازار هدف، محدودیت سرمایه‌گذاری ثابت و نرخ تنزیل است در میان پژوهش‌ها هیچ کدام محدودیت سرمایه‌گذاری ثابت را در نظر نگرفته‌اند به جز پژوهش کیانگ کیانگ [۲۷] که در مدل‌سازی محدودیت هزینه‌ها هر دوره وجود دارد به علاوه در میان پژوهش‌ها هیچ کدام ارزش زمانی پول در نظر گرفته نشده است.

جدول ۳: جدول تحلیل شکاف

۱- ردیف	۲- مرجع	۳- متغیرهای تصمیم						۴- پایداری			۵- ویژگی‌های مدل												۶- تسهیلات لجستیک معکوس						۷- مطالعه موردی				
		مکان‌یابی	تخصیص	تعیین ظرفیت	انتخاب تکنولوژی	انتخاب وسیله نقلیه	اقتصادی	زیست‌محیطی	اجتماعی	تک دوره	چند دوره‌ای	قیمت و هزینه	تقاضا	کیفیت پسماند	تک هدف	چند هدف	متمرکز	غیرمتمرکز	تک محصول	چند محصول	تک بازار	چند بازار	محدودیت سرمایه	نرخ تنزیل	دسته‌بندی	دمونتاژ	نوسازی (تعمیر)	مراکز جمع‌آوری		پسماند خطرناک	مرکز دفن	بازسازی	
۱	[۱۷]	✓					✓	✓	✓						✓		✓				✓				✓	✓				✓		✓	
۲	[۱۸]	✓	✓							✓				✓	✓		✓		✓		✓				✓	✓		✓		✓		✓	
۳	[۱۹]	✓	✓	✓						✓		✓			✓		✓				✓				✓	✓		✓	✓		✓		
۴	[۲۰]	✓	✓	✓						✓		✓	✓	✓	✓		✓				✓				✓	✓		✓		✓		✓	
۵	[۲۱]	✓	✓	✓						✓			✓		✓		✓				✓				✓	✓		✓		✓		✓	
۶	[۲۲]	✓	✓	✓						✓					✓		✓		✓						✓	✓	✓	✓		✓		✓	
۷	[۲۵]	✓	✓	✓						✓					✓		✓		✓		✓				✓	✓		✓		✓		✓	
۸	[۲۶]	✓	✓	✓						✓			✓		✓		✓				✓				✓	✓	✓	✓		✓			
۹	[۲۳]	✓	✓	✓							✓				✓		✓		✓		✓				✓	✓		✓		✓		✓	
۱۰	[۲۷]	✓	✓	✓						✓		✓	✓		✓			✓			✓		✓*					✓		✓		✓	
۱۱	[۲۴]	✓	✓	✓	✓						✓				✓		✓				✓				✓	✓		✓		✓		✓	

* محدودیت هزینه در نظر گرفته شده

✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓			✓		✓				✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	پژوهش
---	---	---	--	---	---	---	---	---	---	--	---	---	--	--	---	--	---	--	--	--	---	--	--	---	---	---	---	---	---	---	-------

ستون ۶ تسهیلات در نظر گرفته شده در شبکه را نشان می دهد که در بین پژوهش ها هیچ کدام بازسازی را در نظر نگرفته اند.

بنابراین وجود پژوهشی که به طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پردازد و حداقل ابعاد اقتصاد و زیست محیطی را در نظر بگیرد و یک برنامه زمانی برای پیاده سازی و راه اندازی شبکه طراحی شده با توجه به محدودیت بودجه ارائه دهد، لازم است. لازم به ذکر است اگرچه پژوهش های زیادی در این حوزه انجام شده است اما ادبیات نشان می دهد که پژوهش مناسب که مدیریت پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی ایران پردازد وجود ندارد.

۲/۵- جمع بندی فصل دوم

در این فصل به بررسی ادبیات حوزه مدیریت زنجیره تأمین WEEE پرداخته شد و پژوهش ها از لحاظ کاربرد آن ها در دنیای واقعی و میزان بودن فرضیات و نحوه مدل سازی و روش حل آن ها مورد بررسی قرار گرفتند. در ابتدای فصل به دسته بندی پژوهش ها حوزه مدیریت زنجیره تأمین WEEE به ۴ دسته مختلف پرداخته و جایگاه پژوهش در میان دسته بندی ها تعیین شد و در ادامه ادبیات مرتبط با پژوهش پیش رو مورد بررسی قرار گرفت.

در میان پژوهش ها، هیچ کدام تصمیماتی غیر از مکان یابی و تخصیص را در نظر نگرفته اند در دنیای واقعی مسئله انتخاب نوع وسیله نقلیه یکی از تصمیمات مهم محسوب می شود چون که وسیله حمل و نقل یکی منابع انتشار کربن است و به علاوه بخش قابل توجه ای از هزینه ها در این بخش صرف می شود. ظرفیت تسهیلات نیز یکی از تصمیمات مهم در زنجیره تأمین است که در هیچ کدام از پژوهش ها در نظر گرفته نشده است. در دنیای واقعی تسهیلات زنجیره تأمین در یک دوره راه اندازی نمی شوند بلکه در طی چندین دوره زمانی این اتفاق می افتد دلیل آن عدم وجود سرمایه لازم برای راه اندازی تمام تسهیلات هست که این محدودیت در هیچ یک از پژوهش ها مدنظر قرار نگرفته اند.

پس از بررسی ادبیات و مقایسه آنها در انتها به بررسی شکاف تحقیقات و جایگاه پژوهش پیش رو در میان آنها پرداخته شد.

فصل سوم: روش تحقیق

مقدمه

در فصل روش تحقیق، ابتدا به تعریف مسئله پرداخته می‌شود در تعریف مسئله، شبکه زنجیره تامین حلقه بسته طراحی می‌شود و متغیرهای تصمیم، اهداف طراحی شبکه و تسهیلات موجود در شبکه به صورت دقیق تعریف و تعیین می‌شود و به علاوه در این بخش سیاست مالیات کربن اتخاذ شده نیز تعریف می‌شود. سپس به فرمول بندی مدل ریاضی پرداخته می‌شود.

تعریف مسئله

امروزه تولید WEEE، روزه‌روز در حال افزایش است این زباله‌ها موجب تخریب و آسیب‌های جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست می‌شوند و این امر موجب نگرانی حامیان محیط‌زیست شده است. مدیریت پایان عمر محصولات موجب کاهش آسیب به طبیعت می‌شود، شبکه CLSC به‌عنوان یک ابزار برای مدیریت پایان عمر محصولات معرفی شده است. در زنجیره تأمین حلقه بسته با ایجاد هماهنگی بین زنجیره تأمین مستقیم و معکوس باعث افزایش بهره‌وری سیستم می‌شود و ایجاد شبکه‌ای که امکان تعمیر و استفاده مجدد در آن وجود داشته باشد میزان پسماندهای که دفع می‌شوند به‌طور چشم‌گیری کاهش خواهد یافت. در یکی از مراحل مهم در طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته، مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات جمع‌آوری است.

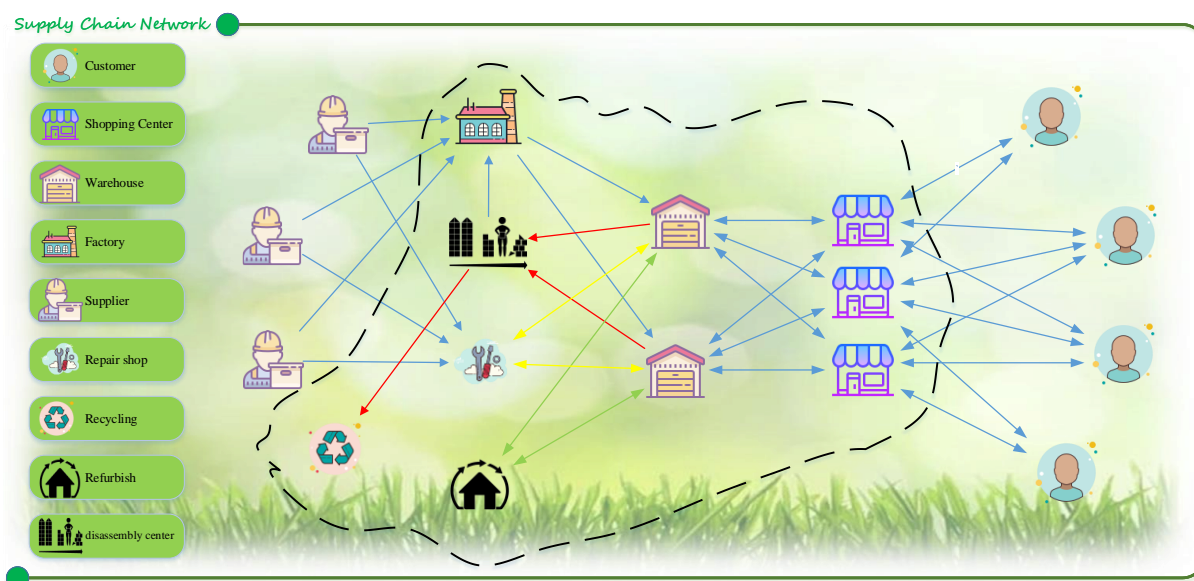
شبکه طراحی شده در این پژوهش مطابق "شکل ۲: نمودار جریان مواد در شبکه" است. هدف این شبکه یکپارچه‌سازی فعالیت‌های زنجیره تأمین پیشرو و معکوس است تسهیلات زنجیره تأمین پیشرو شامل: تأمین‌کننده، تولیدکننده، انبار، توزیع‌کننده است و تسهیلات زنجیره تأمین معکوس شامل مراکز جمع‌آوری، انبار، مراکز دمونتاژ، مراکز بازسازی، مراکز نوسازی و مراکز بازیافت است که در این شبکه حلقه بسته، تسهیلات مراکز جمع‌آوری و توزیع و همچنین انبارهای زنجیره تأمین پیشرو و زنجیره تأمین معکوس تجمیع شده است به هم دلیل ظرفیت انبارها و میزان تقاضای مراکز توزیع به دو بخش محصولات و پسماندها تقسیم می‌شود. پسماندهای جمع‌آوری شده در سه رده کیفیت بالا، متوسط و پایین دسته بنده می‌شوند و برای هر کدام از دسته‌ها یک قیمت متفاوت پرداخته می‌شود درواقع برای پسماندهای بالا که دارای کیفیت بهتری نسبت به

بقیه پسماندها هستند، قیمت بیشتر پرداخت می‌شود و به همین ترتیب برای پسماندهای متوسط قیمت بیشتری به نسبت پسماندهای پایین پرداخت می‌شود. در این شبکه پس از خریداری پسماندها و انبار کردن آن‌های در مراکز انبار، پسماندها بر اساس کیفیت آن‌ها به یکی از مراکز بازسازی، دمونتاز و نوسازی ارسال می‌شود درواقع منطق دسته‌بندی پسماندها به این شکل است که پسماندهای که قابلیت نوسازی دارند در دسته کیفیت بالا قرار می‌گیرند و برای مراکز نوساز ارسال می‌شوند و همچنین پسماندهای که قابلیت بازسازی دارند در دسته کیفیت متوسط قرار می‌گیرند و برای مراکز بازسازی ارسال می‌شوند و سایر پسماندهای در رده کیفیت پایین قرار می‌گیرند و برای مراکز دمونتاز ارسال می‌شوند. در مراکز بازسازی پسماندها تعمیر و همچنین برخی از قطعات و اجزای آن تعویض می‌شود به همین دلیل از تأمین‌کنندگان، جریان مواد اولیه وجود دارد. در مراکز دمونتاز پسماندها دمونتاز می‌شوند و قطعات قابل‌استفاده برای تولیدکننده و قطعات غیرقابل‌استفاده برای بازیافت ارسال می‌شود بنابراین تولیدکننده می‌تواند مواد اولیه خود را از تأمین‌کنندگان و یا از مراکز دمونتاز تأمین کنند. در مراکز بازیافت قطعات بازیافت می‌شود. محصولات تولیدشده از قطعات بازیافتی‌شده و یا قطعات نو، دارای کیفیت یکسان و قیمت یکسانی هستند.

مدل بهینه‌سازی شامل تصمیمات مکان‌یابی (تولیدی، انبارها، مراکز بازسازی، مراکز نوسازی، مراکز دمونتاز و مراکز دفن)، تعیین ظرفیت، تعیین تکنولوژی تولید، 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 تنزیل به دوره بعد انتقال داده می‌شود. علاوه بر این تصمیمات، تصمیمات انتخاب روش حمل‌ونقل مواد اولیه، محصولات و پسماندها (پسماندها به محل دفن) و تکنولوژی تولید محصولات نیز گرفته خواهد شد.

برای مدل ۲ 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، انبار، بازسازی، نوسازی، دmontاژ) و خرید مواد اولیه و پسماند منهای درآمدهای حاصل از فروش محصولات و پسماندهای دmontاژ شده است. برای کمینه‌سازی تأثیرات محیط‌زیستی از سیاست‌های انتشار کربن استفاده شده است. نرخ مالیات انتشار کربن به صورت پله‌ای در نظر گرفته می‌شود که با افزایش میزان انتشار کربن نرخ مالیات افزایش می‌یابد و منابع انتشاری کربن شامل حمل‌ونقل، تولید و بازسازی است.



شکل ۴: شبکه زنجیره تامین حلقه بسته

نرخ پلکانی مالیات کربن

برای محاسبه مالیات انتشار کربن ۴ روش مختلف، ۱- مالیات کربن^۱ ۲- کربن کاپ^۲ ۳- تجارت و کاپ^۳ ۴- انحراف کربن^۴ وجود دارد [۲۹] که پس از بررسی‌ها بهترین روش برای محاسبه مالیات کربن روش پلکانی است. نرخ مالیات این روش مطابق "معادله ۱: نرخ انتشار کربن" است که برای بازه‌های مختلف انتشار، نرخ متفاوتی در نظر گرفته می‌شود که به صورت صعودی افزایش می‌یابد.

^۱ Carbon tax

^۲ Carbon CAP (Consumption-based Accounting and Policy)

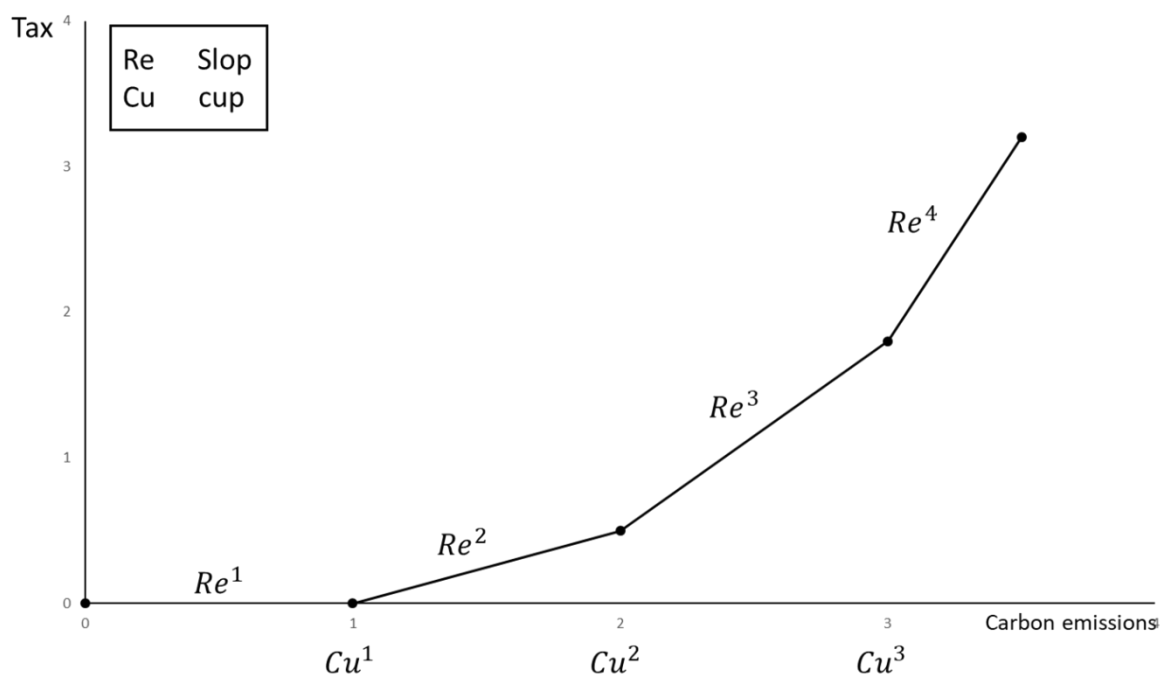
^۳ Cap and trade

^۴ Carbon offset

معادله ۱: نرخ انتشار کربن

$$Rate(En) = \begin{cases} Re_1 & 0 \leq En < Cu_1 \\ Re_2 & Cu_1 \leq En < Cu_2 \\ Re_3 & Cu_2 \leq En < Cu_3 \\ Re_4 & Cu_3 \leq En \end{cases}$$

شکل ۵ تابع مالیات کربن به روش پلکانی است که محور افقی میزان انتشار را نشان می‌دهد و محور عمودی مزاین مالیات را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمودار مالیات کربن

فرمول‌بندی

در این بخش مدل ریاضی فرمول‌بندی می‌شود ابتدا لیست مجموعه‌ها، لیست پارامترها و لیست متغیرهای تصمیم تعریف می‌شود سپس مدل ریاضی تعریف می‌شود. در جدول ۴ لیست مجموعه‌های مدل ریاضی نشان داده شده است:

جدول ۴: جدول مجموعه‌ها

#	نماد	توضیح	#	نماد	توضیح
۱	S	مجموعه تأمین‌کننده‌ها، $s \in S$	۱۱	H(i)	مجموعه ظرفیت‌های انبارها

۲	F	مجموعه تولیدکنندگان $f \in F$	۱۲	H(d)	مجموعه ظرفیت‌های مراکز دمونتاژ
۳	Q	مجموعه مراکز بازیافت $q \in Q$	۱۳	H(n)	مجموعه ظرفیت‌های مراکز نوسازی
۴	D	مجموعه مراکز دمونتاژ $d \in D$	۱۴	H(m)	مجموعه ظرفیت‌های مراکز بازسازی
۵	N	مجموعه مراکز نوسازی $n \in N$	۱۵	H(q)	مجموعه ظرفیت‌های مراکز بازیافت
۶	M	مجموعه مراکز بازسازی $m \in M$	۱۶	T	مجموعه دوره‌های برنامه‌ریزی
۷	I	مجموعه مراکز انبار	۱۷	O	مجموعه تکنولوژی‌های تولید
۸	Z	مجموعه مراکز توزیع	۱۸	K	مجموعه روش‌های حمل‌ونقل
۹	J	مجموعه مواد اولیه	۱۹	Ta	مجموعه پله‌های مالیات انتشار کربن
۱۰	H(o)	مجموعه ظرفیت‌های تولید با تکنولوژی O			

در جدول ۵: لیست پارامترهای مدل لیست پارامترهای مدل ریاضی تعریف می‌شود.

جدول ۵: لیست پارامترهای مدل

#	نماد	توضیح پارامتر	#	نماد	توضیح پارامتر
۱	$Fa_{h,t,o}$	هزینه راه‌اندازی تولیدی با تکنولوژی O و ظرفیت h در دوره t	۲۲	Er_k	نرخ انتشار کربن وسیله نقلیه K برای حمل محصول
۲	$Fw_{h,t}$	هزینه راه‌اندازی انبار با ظرفیت h در دوره t	۲۳	$Er_{k,j}$	نرخ انتشار کربن وسیله نقلیه کربن برای حمل مواد اولیه j
۳	$Fd_{h,t}$	هزینه راه‌اندازی دمونتاژ با ظرفیت h در دوره t	۲۴	Rm_j	تعداد مواد اولیه j در محصول p
۴	$Fr_{h,t}$	هزینه راه‌اندازی نوسازی با ظرفیت h در دوره t	۲۵	$Ca_{h,o}$	ظرفیت تولید با تکنولوژی O و ظرفیت h
۵	$Fm_{h,t}$	هزینه راه‌اندازی بازسازی با ظرفیت h در دوره t	۲۶	Ca_h^i	ظرفیت انبار با ظرفیت h
۶	$Fq_{h,t}$	هزینه راه‌اندازی بازیافت با ظرفیت h در دوره t	۲۷	Ca_h^d	ظرفیت مرکز دمونتاژ با ظرفیت h
۷	$Ds_{b,e}$	فاصله بین تسهیلات e و b	۲۸	Ca_h^n	ظرفیت مرکز نوسازی با ظرفیت h
۸	$C_{j,k,t}$	هزینه حمل ماده اولیه j با وسیله نقلیه k در دوره t	۲۹	Ca_h^m	ظرفیت مرکز بازسازی با ظرفیت h
۹	$C_{k,t}$	هزینه حمل‌ونقل محصول با نقلیه k در دوره t	۳۰	Ca_h^q	ظرفیت مرکز بازیافت با ظرفیت h
۱۰	$Oc_{o,t}$	هزینه تولید محصول در دوره t با تکنولوژی O	۳۱	Bu_t	بودجه راه‌اندازی در دوره t
۱۱	Oci_t	هزینه نگهداری محصول در دوره t	۳۲	r	نرخ تنزیل
۱۲	Ocd_t	هزینه دمونتاژ محصول در دوره t	۳۳	γ_j	درصد قطعات نوع j قابل استفاده در پسماندهای کیفیت پایین
۱۳	Ocn_t	هزینه نوسازی محصول در دوره t	۳۴	ρ_j	درصدی از قطعات j در پسماندهای کیفیت متوسط که باید تعویض شوند
۱۴	Ocm_t	هزینه بازسازی محصول در دوره t	۳۵	λ^1	درصد پسماندها باکیفیت بالا
۱۵	$Ps_{j,s,t}$	هزینه خرید مواد اولیه j در دوره t از تأمین‌کننده s	۳۶	λ^2	درصد پسماندها باکیفیت متوسط
۱۶	$Pq_{j,t}$	قیمت فروش پسماند j در دوره t	۳۷	$De_{t,z}$	تقاضای محصول مرکز توزیع Z در دوره t
۱۷	Pz_t	قیمت فروش محصول در دوره t	۳۸	Bn	یک مقدار خیلی بزرگ
۱۸	Pg_t	قیمت خرید پسماند دارای کیفیت بالا	۳۹	Re_{ta}	نرخ مالیات انتشار کربن در پله ta
۱۹	Pm_t	قیمت خرید پسماند دارای کیفیت متوسط	۴۰	$Be_{t,z}$	میزان بازگشتی محصول از مرکز Z در دوره t به‌عنوان پسماند
۲۰	Pb_t	قیمت خرید پسماند دارای کیفیت بد	۴۱	Cu_{ta}	سقف میزان انتشار در پله ta

۲۱	Er_o	نرخ انتشار یک کیلو گرم کربن به ازای تولید محصول با استفاده از تکنولوژی O (کیلو گرم)
----	--------	---

در جدول ۶: لیست متغیرهای مدل ریاضی ارائه می شود

جدول ۶: لیست متغیرهای مدل ریاضی

#	نماد	توضیح متغیر تصمیم	#	نماد	توضیح متغیر تصمیم
۱	$Wh_{i,h,t}$	۱ راه اندازی انبار i با ظرفیت h در دوره t ۰ در غیر این صورت	۱۰	Tr_k^3	۱ انتخاب نوع حمل و نقل k برای حمل پسماندها ۰ در غیر این صورت
۲	$Ff_{f,h,o,t}$	۱ راه اندازی تولیدی f با تکنولوژی O و ظرفیت h در دوره t ۰ در غیر این صورت	۱۱	$Xm_{j,s,f,t,k}$	میزان حمل مواد اولیه j از تأمین کننده s به تولیدی f در دوره t و وسیله نقلیه k
۳	$Q_{q,h,t}$	۱ راه اندازی بازیافتی q با ظرفیت h در دوره t ۰ در غیر این صورت	۱۲	$X_{s,f,t,k}$	میزان حمل و نقل محصولات بین تسهیلات در دوره t
۴	$Da_{d,h,t}$	۱ راه اندازی دمونتاژ d با ظرفیت h در دوره t ۰ در غیر این صورت	۱۳	$Po_{f,o,t}$	میزان تولید کارخانه f در دوره t با تکنولوژی o
۵	$Rf_{n,h,t}$	۱ راه اندازی نوسازی n با ظرفیت h در دوره t ۰ در غیر این صورت	۱۴	$At_{ta,t}$	میزان انتشار در پله ta
۶	$Rm_{m,h,t}$	۱ راه اندازی بازسازی m با ظرفیت h در دوره t ۰ در غیر این صورت	۱۵	$Sn_{i,t}$	موجودی محصولات نو در انبار i در دوره t
۷	Tr_k^1	۱ انتخاب نوع حمل و نقل k برای حمل ماده اولیه ۰ در غیر این صورت	۱۶	$Sh_{i,t}$	موجودی پسماندکیفیت بالا در انبار i در دوره t
۸	Tr_k^2	۱ انتخاب نوع حمل و نقل k برای حمل محصول ۰ در غیر این صورت	۱۷	$Sm_{i,t}$	موجودی پسماندکیفیت متوسط در انبار i در دوره t
۹	$W_{ta,t}$	۱ پر شدن پله ta در دوره t ۰ در غیر این صورت	۱۸	$Sl_{i,t}$	موجودی پسماندکیفیت پایین در انبار i در دوره t

در ادامه مدل ریاضی ارائه می شود.

$$\min obj = Ntc + Enct \quad ۱$$

$$Ntc = Tfc + Ttc + Toc + tpc - Ben \quad ۲$$

$$Tfc = \sum_{t \in T} (1+r)^{-t} Fc_t \quad ۳$$

مقدار تابع هدف برابر مجموع خالص هزینه‌ها به‌علاوه مجموع مالیات بر انتشار کربن در دوره‌های برنامه ریزی است. معادله ۲ 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 ۳ نشان می‌دهد مجموع هزینه راه‌اندازی برابر مجموع هزینه راه‌اندازی در هر دوره است.

$$Fc_t = \sum_{f \in F} \sum_{h \in H} \sum_{o \in O} Ff_{f,h,o,t} Fa_{h,o,t} + \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} Wh_{i,h,t} Fw_{h,t} + \sum_{d \in D} \sum_{h \in H} Da_{d,h,t} Fd_{h,t} + \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} RF_{n,h,t} Fr_{h,t} + \sum_{m \in M} \sum_{h \in H} Rm_{m,h,t} Fm_{h,t} + \sum_{q \in Q} \sum_{h \in H} Q_{q,h,t} Fq_{h,t} \quad \forall t \in T \quad ۴$$

معادله ۴ مجموع هزینه‌های راه‌اندازی در هر دوره را نشان می‌دهد که برابر مجموع هزینه راه‌اندازی تولیدکننده، انبار، مراکز دمونتاز، مراکز نوسازی، مراکز بازسازی و مراکز بازیافت است.

$$Ttc = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} (1+r)^{-t} \left[\begin{aligned} & \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} C_{k,t} X_{f,i,t,k} Ds_{f,i} + \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} C_{k,t} X_{i,z,t,k} Ds_{z,i} + \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} C_{k,t} X_{z,i,t,k} Ds_{z,i} \\ & + \sum_{d \in D} \sum_{i \in I} C_{k,t} X_{i,d,t,k} Ds_{i,d} + \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} C_{k,t} X_{i,m,t,k} Ds_{i,m} + \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} C_{k,t} X_{i,n,t,k} Ds_{i,n} \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} C_{k,t} X_{n,i,t,k} Ds_{n,i} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} C_{k,t} X_{m,i,t,k} Ds_{m,i} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} C_{j,k,t} X_{j,d,f,t,k} Ds_{d,f} + \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{q \in Q} C_{j,k,t} X_{j,d,q,t,k} Ds_{d,q} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} C_{j,k,t} X_{j,s,m,t,k} Ds_{s,m} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} C_{k,j,t} Ds_{s,f} X_{jsftk} \end{aligned} \right] \quad ۵$$

معادله ۵ هزینه‌های حمل‌ونقل را نشان می‌دهد هر یک از بخش‌های معادله به ترتیب نشان دهنده هزینه حمل‌ونقل مواد اولیه از تأمین به تولید، هزینه حمل نقل محصولات از تولید به انبار، هزینه انتقال محصولات از انبار به مراکز توزیع، هزینه جمع‌آوری پسماندها از مراکز توزیع به انبارها، هزینه انتقال پسماندهای باکیفیت پایین از انبارها به مراکز دمونتاز، هزینه انتقال پسماندهای کیفیت بالا از انبارها به مراکز نوسازی، هزینه انتقال پسماندهای کیفیت متوسط از انبارها به مراکز بازسازی، هزینه انتقال محصولات نوسازی شده از مراکز نوسازی

به انبار، هزینه انتقال پسماندهای بازسازی شده از مراکز بازسازی به انبارها، هزینه انتقال قطعات بازسازی شده از مراکز دمونتاز به تولید و هزینه انتقال مواد اولیه به مراکز بازسازی است.

$$Toc = \sum_{t \in T} (1+r)^{-t} \left[\sum_{f \in F} \sum_{o \in O} P_{f,o,t} Oc_{o,t} + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} Ocd_t X_{i,d,t,k} + \right. \\ \left. \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} Ocn_t X_{i,n,t,k} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} Ocm_t X_{i,m,t,k} + \right. \\ \left. \sum_{z \in Z} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} Oci_t (X_{i,z,t,k} + X_{z,i,t,k} + Sn_{i,t} + Sh_{i,t} + Sm_{i,t} + Sl_{i,t}) \right] \quad 6$$

معادله ۶ هزینه عملیات را نشان می‌دهد که برابر مجموع هزینه‌های تولید، نگهداری در انبار، دمونتاز، نوسازی، و بازسازی است. هزینه نگهداری در انبارها برابر با حاصل ضرب هزینه نگهداری هر دوره در مجموع محصولات ارسال شده به مراکز توزیع، پسماندهای جمع‌آوری شده و موجودی محصولات نو، پسماندهای کیفیت بالا، پسماندهای کیفیت متوسط و پسماندهای کیفیت پایین انبار است.

$$Tpc = \sum_{t \in T} (1+t)^{-t} \left[\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{k \in K} Ps_{j,s,t} Xm_{j,s,f,t,k} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} Ps_{j,s,t} Xm_{j,s,m,t,k} + \right. \\ \left. \sum_{z \in Z} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} Pz_t^1 \lambda^1 X_{z,i,k,t} + \sum_{z \in Z} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} Pz_t^2 \lambda^2 X_{z,i,k,t} + \right. \\ \left. \sum_{z \in Z} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} Pz_t^3 (1-\lambda^1 - \lambda^2) X_{z,i,k,t} \right] \quad 7$$

معادله ۷ هزینه خرید مواد اولیه را نشان می‌دهد که بخش اول و دوم آن مجموع هزینه خرید مواد اولیه برای واحدهای تولیدی و مرکز بازسازی است و بخش دوم هزینه خرید پسماندها را نشان می‌دهد.

$$Ben = \sum_{t \in T} (1+r)^{-t} \left[\sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} Pz_t X_{i,z,t,k} + \sum_{d \in D} \sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} Pq_{t,j} Xm_{j,d,q,t,k} \right] \quad 8$$

$$En_t = Ten_t + Pen_t \quad \forall t \in T \quad 9$$

$$\begin{aligned}
Ten_t = & \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} Er_k X_{f,i,t,k} Ds_{f,i} + \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} Er_k X_{i,z,t,k} Ds_{z,i} + \\
& \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} Er_k X_{z,i,t,k} Ds_{z,i} + \sum_{d \in D} \sum_{i \in I} Er_k X_{i,d,t,k} Ds_{i,d} + \\
& \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} Er_k X_{i,m,t,k} Ds_{i,m} + \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} Er_k X_{i,n,t,k} Ds_{i,n} + \\
& \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} Er_k X_{n,i,t,k} Ds_{n,i} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} Er_k X_{m,i,t,k} Ds_{m,i} + \\
& \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} Er_{k,j} X_{m_{j,d,f,t,k}} Ds_{d,f} + \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{q \in Q} Er_{k,j} X_{m_{j,d,q,t,k}} Ds_{d,q} + \\
& \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} Er_{k,j} X_{m_{j,s,m,t,k}} Ds_{s,m} + \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{j \in J} Er_{k,j} Ds_{s,f} X_{m_{j,s,f,t,k}} \\
Pen_t = & \sum_{o \in O} \sum_{f \in F} Er_o P_{f,o,t} \quad \forall t \in T \quad 10
\end{aligned}$$

معادله ۸ مجموع سود ناشی از فروش محصولات و پسماندها را نشان می‌دهد. معادله ۹ میزان انتشار کربن را نشان می‌دهد که برابر با مجموع انتشار کربن در مراکز تولیدی و حمل‌ونقل است. معادله ۱۰ میزان انتشار کربن در حمل‌ونقل را نشان می‌دهد که برابر نرخ انتشار کربن $\left(\frac{\text{kg}}{\text{km}} * (\text{محصول}) \right)$ ضرب در مصافت حمل شده ضرب در تعداد محصول است و معادله ۱۱ میزان انتشار کربن در تولید محصولات را نشان می‌دهد.

$$Enct = \sum_{t \in T} (1+r)^{-t} Enc_t \quad 12$$

$$Enc_t = \sum_{ta \in Ta} Re_{ta} At_{ta,t} \quad \forall t \in T \quad 13$$

$$En_t = \sum_{ta \in Ta} At_{ta,t} \quad \forall t \in T \quad 14$$

$$Cu^1 W_{1,t} \leq At_{1,t} \leq Cu^1 \quad \forall t \in T \quad 15$$

$$(Cu^{ta} - Cu^{ta-1}) W_{ta,t} \leq At_{ta,t} \leq (Cu^{ta} - Cu^{ta-1}) W_{ta-1,t} \quad \forall ta \in \{2, \dots, Ta-1\}, t \in T \quad 16$$

$$0 \leq At_{ta,t} \leq Bn W_{Ta-1,t} \quad \forall t \in T \quad 17$$

معادله‌های ۱۳-۱۷ محدودیت‌های خطی سازی تابع مالیات انتشار کربن را نشان می‌دهد همچنین محدودیت ۱۲ مجموع مالیات انتشار کربن را نشان می‌دهد که با نرخ تنزیل جمع شده‌اند.

$$\sum_{s \in S} X_{j,s,f,t,k} m_{j,s,f,t,k} + \sum_{d \in D} X_{j,d,f,t,k} m_{j,d,f,t,k} = R m_j \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{f,i,t,k} \quad \forall j \in J, f \in F, t \in T \quad 18$$

محدودیت ۱۸ تعادل جریان در مراکز تولیدی را نشان می‌دهد که باید میزان ورودی هر یک از مواد اولیه از تأمین‌کنندگان و واحدهای دمونتاز برابر میزان مواد اولیه استفاده‌شده در محصولات خروجی باشد.

$$\sum_{f \in F} \sum_{k \in K} X_{j,d,f,t+1,k} m_{j,d,f,t+1,k} = \gamma_j R m_j \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{i,d,t,k} \quad \forall j \in J, d \in D, t \in T \quad 19$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{k \in K} X_{j,d,f,1,k} m_{j,d,f,1,k} = 0 \quad \forall j \in J, d \in D \quad 20$$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} X_{j,d,q,t+1,k} m_{j,d,q,t+1,k} = (1 - \gamma_j) R m_j \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{i,d,t,k} \quad \forall j \in J, d \in D, t \in T \quad 21$$

محدودیت‌های ۱۹ و ۲۱ تعادل جریان را در واحدهای دمونتاز را نشان می‌دهد که میزان ورودی در هر دوره برابر میزان خروجی دوره آینده است و به علاوه میزان خروجی دوره اول صفر خواهد بود.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{i,n,t,k} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{n,i,t+1,k} \quad \forall n \in N, t \in T \quad 22$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{n,i,1,k} = 0 \quad \forall n \in N \quad 23$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{i,m,t,k} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{m,i,t+1,k} \quad \forall m \in M, t \in T \quad 24$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{m,i,1,k} = 0 \quad \forall m \in M \quad 25$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} X_{j,s,m,t,k} = \rho_j R m_j \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{m,i,t,k} \quad \forall m \in M, t \in T, j \in J \quad 26$$

محدودیت‌های ۲۲ و ۲۴ تعادل جریان در واحدهای نوسازی و بازسازی را نشان می‌دهد که میزان خروجی هر دوره برابر میزان ورودی دوره قبل است. معادله ۲۶ میزان مواد اولیه مورد نیاز مراکز بازسازی را نشان می‌دهد.

$$\sum_{f \in F} \sum_{k \in K} X_{f,i,t,k} + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} X_{m,i,t,k} + \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} X_{n,i,t,k} + Sn_{i,t-1} = \sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} X_{z,i,t,k} + Sn_{i,t} \quad \forall t \in T, i \in I \quad ۲۷$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{k \in K} X_{n,i,t,k} + Sh_{i,t} = \lambda^1 \sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} X_{z,i,t,k} + Sh_{i,t-1} \quad \forall t \in T, i \in I \quad ۲۸$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{k \in K} X_{m,i,t,k} + Sm_{i,t} = \lambda^2 \sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} X_{z,i,t,k} + Sm_{i,t-1} \quad \forall t \in T, i \in I \quad ۲۹$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{k \in K} X_{d,i,t,k} + Sl_{i,t} = (1 - \lambda^1 - \lambda^2) \sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} X_{z,i,t,k} + Sl_{i,t-1} \quad \forall t \in T, i \in I \quad ۳۰$$

محدودیت ۲۷ تعادل جریان محصولات نو در انبارها را نشان می‌دهد که در این معادله مجموع محصولات بازسازی شد، نوسازی شد و محصولات نو به علاوه موجودی انبار در دوره جاری باید برابر مجموع محصولات ارسال شده به مراکز توزیع و موجودی دوره آیند باشد. محدودیت ۲۸ میزان پسماندهای دارای کیفیت بالا که باید برای مراکز نوسازی ارسال شود را نشان می‌دهد که باید میزان پسماند ارسالی به نوسازی به علاوه موجودی در دوره جاری برابر میزان پسماندها باکیفیت بالا به علاوه موجودی پسماندهای کیفیت بالا دوره قبل باشد. محدودیت ۲۹ میزان پسماندهای دارای کیفیت متوسط که برای مراکز بازسازی ارسال شود را نشان می‌دهد. محدودیت ۳۰ میزان پسماندهای دارای کیفیت پایین که باید برای مراکز بازسازی ارسال شود را نشان می‌دهد.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{f,i,t,k} \leq \sum_{h \in H} \sum_{o \in O} \sum_{g=0}^t Ff_{fhog} Ca_{h,o} \quad \forall f \in F, t \in T \quad ۳۱$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{o \in O} \sum_{t \in T} Ff_{fhog} \leq 1 \quad \forall f \in F \quad ۳۲$$

معادله ۳۱ محدودیت ظرفیت واحدهای تولیدی را نشان می‌دهد و محدودیت ۳۲ تضمین می‌کند که واحد تولید تنها با یک سطح تولید و یک سطح تکنولوژی و یک دوره راهاندازی می‌شود.

$$\sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} X_{z,i,t,k} + Sn_{i,t} + \sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} X_{z,i,t,k} + Sh_{i,t} + Sm_{i,t} + Sl_{i,t} \leq \sum_{h \in H} \sum_{g=0}^t Wh_{i,h,g} Ca_h^i \quad \forall i \in I, t \in T \quad ۳۳$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Wh_{i,h,t} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad ۳۴$$

معادله ۳۳ محدودیت ظرفیت انبارها را نشان می‌دهد که برابر مجموع محصولات، پسماندها و موجودی آنها است.

محدودیت ۳۴ تضمین می‌کند که واحد تنها با یک سطح تولید و در یک دوره راه‌اندازی شود.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{i,d,t,k} \leq \sum_{h \in H} \sum_{g=0}^t Ca_h^d Da_{d,h,g} \quad \forall d \in D, t \in T \quad ۳۵$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Da_{d,h,t} \leq 1 \quad \forall d \in D \quad ۳۶$$

معادله ۳۵، محدودیت ظرفیت مرکز دمونتاز را نشان می‌دهد و محدودیت ۳۶ تضمین می‌کند که واحد دمونتاز تنها با

یک سطح ظرفیت و در یک دوره راه‌اندازی شود.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{n,i,t,k} \leq \sum_{h \in H} \sum_{g=0}^t Ca_h^n Rf_{n,h,g} \quad \forall n \in N, t \in T \quad ۳۷$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Rf_{n,h,t} \leq 1 \quad \forall n \in N \quad ۳۸$$

معادله ۳۷ محدودیت ظرفیت نوسازی را نشان می‌دهد و محدودیت ۳۸ تضمین می‌کند که واحد نوسازی تنها با یک

سطح ظرفیت و در یک دوره راه‌اندازی شود.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{m,i,t,k} \leq \sum_{h \in H} \sum_{g=0}^t Ca_h^m Rm_{m,h,g} \quad \forall m \in M, t \in T \quad ۳۹$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Rm_{m,h,t} \leq 1 \quad \forall m \in M \quad ۴۰$$

معادله ۳۹ محدودیت ظرفیت بازسازی را نشان می‌دهد. محدودیت ۴۰ تضمین می‌کند که واحد بازسازی تنها با یک

سطح ظرفیت و در یک دوره راه‌اندازی شود.

$$\sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} X_{m,j,d,q,t,k} \leq \sum_{h \in H} \sum_{g=0}^t Ca_h^q Q_{q,h,g} \quad \forall q \in Q, t \in T \quad ۴۱$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Q_{q,h,t} \leq 1 \quad \forall q \in Q \quad ۴۲$$

معادله ۴۱ محدودیت ظرفیت مراکز بازیافت را نشان می‌دهد. محدودیت ۴۲ تضمین می‌کند که واحد بازیافت تنها با یک سطح ظرفیت و در یک دوره راه‌اندازی شود.

$$Fc_t \leq Bu_t + \sum_{g=0}^{t-1} (1+r)^g (Bu_g - Fc_g) \quad \forall t \in T \quad 43$$

معادله ۴۳ محدودیت بودجه هزینه راه‌اندازی را نشان می‌دهد که میزان هزینه در هر دوره باید کم‌تر از مجموعه بودجه دوره جاری و باقی مانده بودجه‌ها دوره قبل باشد.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{i,z,t,k} \leq De_{t,z} \quad \forall t \in T, z \in Z \quad 44$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{Z,i,t,k} \leq Be_{t,z} \quad \forall t \in T, z \in Z \quad 45$$

معادله ۴۴ برآورد شدن تقاضا در هر کدام از توزیع‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. معادله ۴۵ میزان بازگشت کل پسماندها را نشان می‌دهد.

$$\sum_{k \in K} Tr_k^1 \leq 1 \quad 46$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} X m_{j,s,f,t,k} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} X m_{j,s,m,t,k} + \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} X m_{j,d,f,t,k} \leq Bn \text{ Tr}_k^1 \quad \forall k \in K \quad 47$$

$$\sum_{k \in K} Tr_k^2 \leq 1 \quad 48$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} X_{m,i,t,k} + \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} X_{n,i,t,k} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} X_{i,m,t,k} + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} X_{i,n,t,k} + \sum_{z \in Z} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} X_{z,i,t,k} + \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} X_{i,z,t,k} + \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} X_{f,i,t,k} + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} X_{i,d,t,k} \leq Bn \text{ Tr}_k^2 \quad \forall k \in K \quad 49$$

$$\sum_{k \in K} Tr_k^3 \leq 1 \quad 50$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{q \in Q} \sum_{t \in T} X m_{j,d,q,t,k} \leq B n \operatorname{Tr}_k^3 \quad \forall k \in K \quad ۵۱$$

محدودیت‌های ۴۶-۴۷ تضمین می‌کند که برای حمل مواد اولیه تنها یکی از روش‌های حمل‌ونقل انتخاب می‌شود. محدودیت‌های ۴۸-۴۹ تضمین می‌کند که تنها یک روش از روش‌های حمل‌ونقل برای حمل محصولات انتخاب می‌شود و همچنین محدودیت‌های ۵۰-۵۱ تضمین می‌کند که حمل پسماندها به سمت مراکز بازیافت تنها یکی از روش‌های حمل‌ونقل انتخاب می‌شود.

$$\sum_{o \in O} P o_{f,o,t} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{f,i,t,k} \quad \forall f \in F, t \in T \quad ۵۲$$

$$P o_{f,o,t} \leq \sum_{h \in H} \sum_{g=0}^t B n \operatorname{Ff}_{f,h,o,g} \quad \forall f \in F, t \in T, o \in O \quad ۵۳$$

محدودیت ۵۲ مقدار تولید هریک از کارخانه‌ها را در دوره‌های برنامه ریزی تعیین می‌کنند و معادله ۵۳ تضمین می‌کند که محصولات با تکنولوژی تولید می‌شود که راه‌اندازی شد است.

$$W h_{i,h,t}, F f_{f,h,o,t}, Q_{q,h,t}, D a_{d,h,t}, R f_{n,h,t}, R m_{m,h,t}, T r_k^1, T r_k^2, T r_k^3, W_{ta,t} \in (0,1) \quad ۵۴$$

$$X m_{j,s,f,t,k}, X_{s,f,t,k}, P o_{f,o,t}, S n_{i,t}, S h_{i,t}, S m_{i,t}, S l_{i,t} \in Z^+ \quad ۵۵$$

$$A t_{ta,t} \in R^+ \quad ۵۶$$

محدودیت‌های ۵۴ محدودیت باینری بود محدودیت‌ها را تعیین می‌کند و محدودیت ۵۵ محدودیت متغیرهای عدد صحیح است و محدودیت ۵۶ محدودیت متغیرهای اعداد طبیعی است.

منابع و مراجع

- [۱] ج. ح. رضا، د. مرتضی، and هدایتی، امیر، مدیریت پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی مبانی، سیستم ها، سایت ها. انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۲.
- [۲] N. H. Md Tasbirul Islam, "Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste in reverse logistics (RL) and closed-loop supply chain (CLSC) research: A review," *Resources, Conservation & Recycling*, ۲۰۱۷.
- [۳] 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. ۱۳۷, pp. ۴۸-۷۵, ۲۰۱۸.
- [۴] B. J. La Londe and J. M. Masters, "Emerging logistics strategies: blueprints for the next century," *International journal of physical distribution & logistics management*, vol. ۲۴, no. ۷, pp. ۳۵-۴۷, ۱۹۹۴.
- [۵] D. M. Lambert, J. R. Stock, and L. M. Ellram, *Fundamentals of logistics management*. McGraw-Hill/Irwin, ۱۹۹۸.
- [۶] M. Christopher, *Logistics and supply chain management: creating value-adding networks*. Pearson education, ۲۰۰۵.
- [۷] J. R. Stock, *Reverse logistics: White paper*. Council of Logistics Management, ۱۹۹۲.
- [۸] R. Tibben-Lembke and D. Rogers, "Going backwards: reverse logistics trends and practices," *Reverse Logistics Executive Council*, ۱۹۹۸.
- [۹] H. Min and H.-J. Ko, "The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers," *International Journal of Production Economics*, vol. ۱۱۳, no. ۱, pp. ۱۷۶-۱۹۲, ۲۰۰۸.
- [۱۰] 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. ۲۴۰, no. ۳, pp. ۶۰۳-۶۲۶, ۲۰۱۵.
- [۱۱] C. J. Cleveland and C. G. Morris, *Dictionary of energy*. Elsevier, ۲۰۰۵.
- [۱۲] J. Shogren, *Encyclopedia of energy, natural resource, and environmental economics*. Newnes, ۲۰۱۳.
- [۱۳] 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. ۳۱, no. ۷, pp. ۱۶۴۵-۱۶۶۰, ۲۰۱۱.
- [۱۴] G. T. Temur, T. Kaya, and C. Kahraman, "Facility location selection in reverse logistics using a type-۲ fuzzy decision aid method," in *Supply chain management under fuzziness*: Springer, ۲۰۱۴, pp. ۵۹۱-۶۰۶.

- 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. ۶۰, pp. ۱۴-۳۱, ۲۰۱۷. [۱۵]
- J. Stock, "Reverse logistics, white paper, council of logistics management," *IL: Oak Brook*, ۱۹۹۲. [۱۶]
- S. Shokouhyar and A. Aalirezai, "Designing a sustainable recovery network for waste from electrical and electronic equipment using a genetic algorithm," *International Journal of Environment and Sustainable Development*, vol. ۱۶, no. ۱, pp. ۶۰-۷۹, ۲۰۱۷. [۱۷]
- 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. ۳۷, no. ۵, p. ۱۱۵۳, ۲۰۱۶. [۱۸]
- 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. ۸, no. ۱۲, p. ۱۳۳۱, ۲۰۱۶. [۱۹]
- B. Ayvaz, B. Bolat, and N. Aydın, "Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment," *Resources, conservation and recycling*, vol. ۱۰۴, pp. ۳۹۱-۴۰۴, ۲۰۱۵. [۲۰]
- 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. ۹۵, pp. ۱۲۰-۱۳۲, ۲۰۱۵. [۲۱]
- 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)*, ۲۰۱۵: IEEE, pp. ۱-۶. [۲۲]
- I. Tari and S. A. Alumur, "Collection center location with equity considerations in reverse logistics networks," *INFOR: Information Systems and Operational Research*, vol. ۵۲, no. ۴, pp. ۱۵۷-۱۷۳, ۲۰۱۴. [۲۳]
- S. A. Alumur, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama, and V. Verter, "Multi-period reverse logistics network design," *European Journal of Operational Research*, vol. ۲۲۰, no. ۱, pp. ۶۷-۷۸, ۲۰۱۲. [۲۴]
- 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. ۵۳, no. ۱۰, pp. ۳۱۲۰-۳۱۴۰, ۲۰۱۵. [۲۵]
- S. H. Amin and G. Zhang, "A three-stage model for closed-loop supply chain configuration under uncertainty," *International Journal of Production Research*, vol. ۵۱, no. ۵, pp. ۱۴۰۵-۱۴۲۵, ۲۰۱۳. [۲۶]
- Q. Qiang, K. Ke, T. Anderson, and J. Dong, "The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties," *Omega*, vol. ۴۱, no. ۲, pp. ۱۸۶-۱۹۴, ۲۰۱۳. [۲۷]

- [۲۸] "ایین نامه اجرایی بند ج ماده ۱۰۴ قانون برنامه توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران," in 1473/319-5328/105, ed "ایران, ۱۳۹۷.
- [۲۹] C. Waltho, S. Elhedhli, and F. Gzara, "Green supply chain network design: A review focused on policy adoption and emission quantification," *International Journal of Production Economics*, ۲۰۱۸.