

## 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 قابل توجهی داشته است به گونه‌ای بر اساس گزارش "مرکز تجزیه و تحلیل اطلاعات دی‌اکسید کربن"<sup>۱</sup> میزان غلظت دی‌اکسید کربن در سال ۱۹۵۸ از ۳۱۵ بخش در میلیون<sup>۲</sup> 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 به عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های صنعت، که شامل فعالیت‌های حمل‌ونقل، تولید و .... است، سهم قابل توجهی 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 قابل توجهی 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 الکترونیکی و الکتریکی به دلیل پیشرفت روزانه تکنولوژی و عرضه محصولات با تکنولوژی‌های بالا، میزان تولید پسماند بالای دارند. پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی<sup>۳</sup> پتانسیل بالای برای بازگشت به چرخه‌ای تولید را دارا هستند به دلیل این که، این محصولات تا پایان عمر مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و معمولاً قبل از پایان عمر به دلیل ورود تکنولوژی‌های جدید از رده خارج می‌شود.

### مرور ادبیات

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<sup>[۱]</sup>. حوزه طراحی

<sup>۱</sup> Carbon Dioxide Information Analysis Center

<sup>۲</sup> PPM

<sup>۳</sup> WEEE

و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین به طراحی شبکه، مکان‌یابی، تخصیص جریان، انتخاب تکنولوژی تولید و ... می‌پردازد. 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<sup>۱</sup> و همکاران [۲] برای اجرای کردن دستورالعمل اروپا WEEE، به ارائه مدل ریاضی MILP<sup>۲</sup> 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 متمرکز شده است. به‌عنوان نمونه تمور و همکاران [۳] 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<sup>۳</sup> 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 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 کیزوفی<sup>۴</sup> و همکاران [۴] 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 دینفعان و مشتریان درگیر، پرداخته می‌شود از نمونه مطالعات این حوزه، مقاله "لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته: بررسی کامل برای کشف آینده" [۵] است که با بررسی ۳۸۲ مقاله منتشرشده در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ 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 [۶]

<sup>۱</sup> MI Gomes

<sup>۲</sup> Mixed integer linear programming

<sup>۳</sup> TOPSIS

<sup>۴</sup> Verônica Ghisolfi

است که به بررسی عوامل مهم مؤثر بر تشویقی مردم به شرکت در بازیافت زباله الکترونیکی پرداخته‌اند. در این پژوهش نشان داده‌اند که حدود ۵۸.۷ درصد از مردم ایران بدون هیچ طرح تشویقی تمایل به شرکت در برنامه‌های بازیافت را دارند به علاوه نشان داده اند که از عوامل مؤثر بر شرکت در برنامه‌های بازیافت ۱- درآمد خانوار ، ۲- اندازه خانوار ، ۳- تحصیلات ، ۴- سطح نگرانی در مورد پسماندهای الکترونیکی و ۴- وضعیت تأهل است.

### ۱-۱- زنجیره تأمین معکوس

شکری و علیرضایی [۷] در مقاله‌ای تحت عنوان "طراحی شبکه معکوس برای پسماندهای تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی و استفاده از الگوریتم ژنتیک"، یک مدل ریاضی برای مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری 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 به‌اندازه ظرفیت شبکه و یا بیشتر موجود است).

یکی از بخش‌های که در طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس می‌تواند در نظر گرفت بخش دمونتاز<sup>۱</sup> است در این بخش، پسماندهای بازگشتی دمونتاز شده و قسمت‌های قابل‌استفاده برای بازسازی ارسال و قسمت‌های غیرقابل استفاده برای دفن می‌شوند. در شبکه زنجیره تأمین معکوس طراحی شده توسط کینگ و ژاو [۸] بخشی تحت عنوان آزمودن 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 تک‌محصولی است که با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استوار، مدل حل شده است به‌علاوه هدف مدل بهینه‌سازی جریان شبکه و تعداد آزمایش‌های انجام شده در بخش آزمودن 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 به‌صورت نرخ ثابت در نظر گرفته شده است به‌عنوان مثال یو و سولوانگ [۹] در مقاله‌ای تحت عنوان "برنامه‌ریزی تصادفی با رویکرد بهبود معیارهای کلیدی روش مبتنی بر سناریو<sup>۲</sup> 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 به‌علاوه پارامترهای قیمت محصولات

---

<sup>۱</sup>dis assembly  
<sup>۲</sup>Scenario-Based

بازسازی شده و مواد بازسازی شده تصادفی در نظر گرفته شده است. آیهزا و همکاران [۱۰] 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<sup>۱</sup>، مرکز دسته‌بندی<sup>۲</sup>، مرکز بازیافت<sup>۳</sup>، مرکز پالایش<sup>۴</sup>، 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 زده شده است علاوه بر این پارامتر، مقدار پسماندها و هزینه حمل‌ونقل نیز به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شده است.

کیلیک و همکاران [۱۱] 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 گرفته شده است که برای هر یک از ۴ گروه پسماند یک نرخ بازیافت<sup>۵</sup> مختلف برآورد شده است. در مطالعه موردی مدل ریاضی برای ۱۰ سناریو مختلف درباره میزان جمع‌آوری پسماندها حل شده است.

البادرویی و همکاران [۱۲] 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 ارائه شده تنها بعد اقتصادی مسئله که شامل هزینه حمل‌ونقل، هزینه جمع‌آوری و هزینه راه‌اندازی تسهیلات در نظر گرفته شده 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) استفاده شده است با 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 عهده شرکت‌ها تولیدکننده واگذار کرده است و همچنین قانون‌های نیز برای اجرای شده آن تصویب شده است. تاری و آلمور [۱۳] در راستای اجرای کردن قانون مسئولیت تولیدکننده

---

collecting centers<sup>۱</sup>

sorting centers<sup>۲</sup>

recycling centers<sup>۳</sup>

refinery centers<sup>۴</sup>

Recovery<sup>۵</sup>

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 تقسیم‌شده است. در این مدل قیمت خرید پسماندها در نظر گرفته نشده است.

سیل الومور و همکاران [۱۴] به ارائه زنجیره تأمین معکوس چند دوره‌ی 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 پرداخته‌شده است. ظرفیت مراکز به صورت مودولار<sup>۱</sup> در نظر گرفته‌شده 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 جمع‌آوری‌شده قابلیت بازسازی را دارند 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.

#### ۱-۲- زنجیره تأمین حلقه بسته

چین و همکاران [۱۵] یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای بازیافت کارتریج در چین ارائه داده‌اند در این شبکه ۴ شریک تأمین‌کننده، تولیدکننده، انبار و توزیع‌کننده در زنجیره تأمین پیشرو و ۴ 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 پسماندهای با کیفیت بد، دمونتاز و بخش قابل‌استفاده در تولید محصولات نو مورد استفاده 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 مورد نیاز خود را از تأمین‌کنندگان مواد اولیه و یا مواد اولیه بازیافت شده تأمین کنند. گرفته‌شده است به عنوان مثال قیمت خرید کارتریج باکیفیت خوب که قابلیت تعمیر و استفاده دوباره از آن وجود دارد با

<sup>۱</sup> modular

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 [۱۶] 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<sup>۱</sup> (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 [۱۷] 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 در قبال محصولات جدید و محصولات تولید شده از مواد اولیه بازیافتی بی تفاوت عمل می کنند و برای آن ها 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 رادارند و مابقی پسماندها غیرقابل استفاده هستند تفکیک بخش های قابل استفاده پسماندها دارای هزینه ای است که در مدل ریاضی در نظر

<sup>1</sup> Quality function deployment

گرفته نشده است. مقدار تقاضا به صورت تابعی از قیمت محصولات در نظر گرفته شده که تابع توزیع مقادیر تقاضا برای قیمت‌ها مختلف تخمین زده شده است. برای حل مدل ریاضی مثال عددی بیان شده است

مرور ادبیات مطالعات و پژوهش‌های که در حوزه 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. در میان پژوهش‌های انجام شده هیچ‌کدام محدودیت بودجه برای سرمایه‌گذاری ثابت را در نظر نگرفته‌اند به علاوه تعداد کمی از آن‌ها ۳ بعد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را به صورت 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 پردازد و حداقل ابعاد اقتصاد و زیست‌محیطی را در نظر بگیرد و یک برنامه زمانی برای پیاده‌سازی و راه‌اندازی شبکه طراحی شده با توجه به محدودیت بودجه ثابت ارائه دهد، لازم است. لازم به ذکر است اگرچه پژوهش‌های زیادی در این حوزه انجام شده است اما ادبیات نشان می‌دهد که پژوهش مناسب که مدیریت پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی ایران پردازد وجود ندارد.

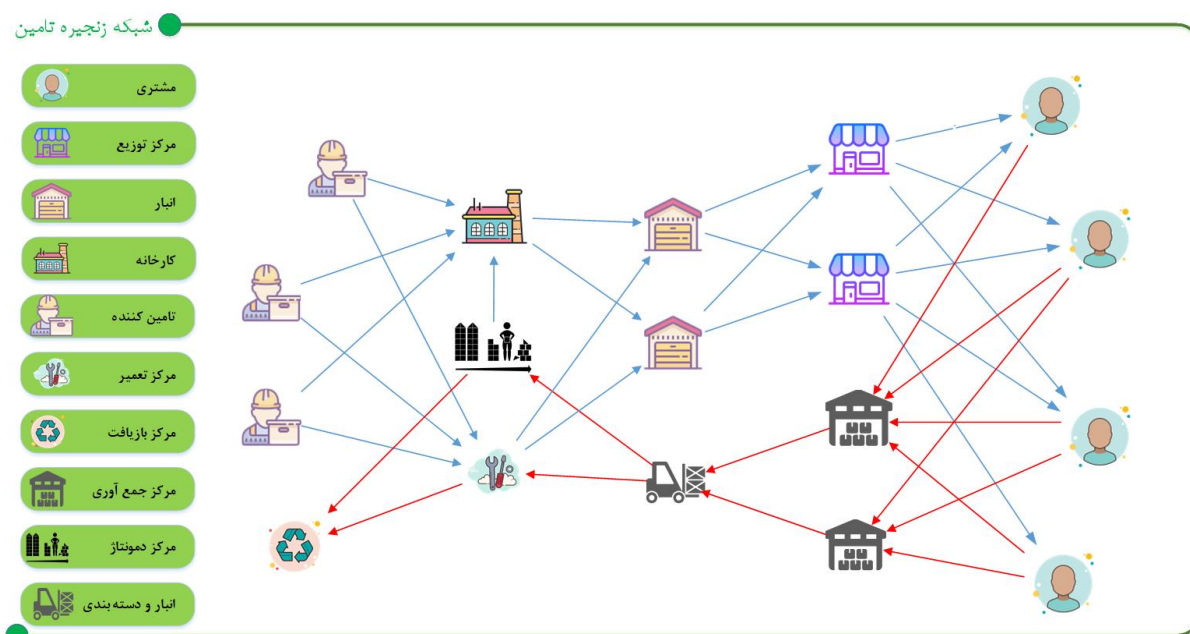
### تعریف مسئله

شبکه طراحی شده در این پژوهش مطابق "شکل ۱: شبکه زنجیره تأمین 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 دمونتاز، مراکز تعمیر و مراکز بازیافت است پسماندهای جمع‌آوری شده در دو رده کیفیت قابل تعمیر و غیر قابل تعمیر دسته بندی می‌شوند و برای هر کدام از دسته‌ها یک قیمت متفاوت پرداخته می‌شود. پس از خریداری پسماندها در مراکز جمع‌آوری، 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 دمونتاز ارسال 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 دمونتاز پسماندهای دمونتاز و قطعات قابل استفاد برای کارخانه‌ها و قطعات غیر قابل استفاده به مراکز بازیافت ارسال می‌شود.

مدل بهینه‌سازی شامل تصمیمات مکان‌یابی (کارخانه، انبار، تعمیرگاه‌ها، مراکز دمونتاز، مرکز انبار و دسته‌بندی و مراکز بازیافت)، تعیین ظرفیت، تخصیص محصولات و پسماندها به تسهیلات و میزان جریان بین تسهیلات است مدل به صورت چند دوره‌ای و با

در نظر گرفتن محدودیت بودجه مدل سازی شده است منظور از محدودیت بودجه، محدودیت در هزینه های ثابت برای راه اندازی تسهیلات است بنابراین راه اندازی تسهیلات شبکه طی چند دوره زمانی و بر اساس میزان بودجه تخصیص داده شده در هر دوره انجام و میزان بودجه اضافی در هر دوره با نرخ تورم به دوره بعد انتقال داده می شود.

برای مدل ۲ هدف کمینه سازی خالص هزینه ها و تأثیرات محیط زیست در نظر گرفته شده است که خالص هزینه ها برابر مجموع هزینه های راه اندازی تسهیلات، حمل و نقل (حمل و نقل 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 کمینه سازی تأثیرات محیط زیستی از سیاست های انتشار کربن استفاده شده است. نرخ مالیات انتشار کربن به صورت پله ای در نظر گرفته می شود که با افزایش میزان انتشار کربن نرخ مالیات افزایش می یابد و منابع انتشار کربن شامل حمل و نقل، تولید و بازسازی است.



شکل ۱: شبکه زنجیره تامین حلقه بسته

### ۱-۳- فرمول بندی

در این بخش مجموعه ها و اندیس ها مورد استفاده در مدل ریاضی تعریف می شود.

جدول ۱: جدول مجموعه ها

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



۲	F	مجموعه تولیدکنندگان $f \in F$	۱۲	H(d)	مجموعه ظرفیت‌های مراکز دمونتاز
۳	Q	مجموعه مراکز بازیافت $q \in Q$	۱۳	H(n)	مجموعه ظرفیت‌های تعمیرگاه ها
۴	D	مجموعه مراکز دمونتاز $d \in D$	۱۴	H(q)	مجموعه ظرفیت‌های مراکز بازیافت
۵	N	مجموعه تعمیرگاه ها $n \in N$	۱۵	H(g)	مجموعه ظرفیت مرکز انبار و دسته‌بندی
۷	I	مجموعه مراکز انبار		H(p)	مجموعه ظرفیت‌های تولید برای محصول p
	B	مجموعه مراکز جمع آوری		Ta	مجموعه پله‌های مالیات انتشار کربن
۸	Z	مجموعه مراکز توزیع		T	مجموعه دوره‌های برنامه‌ریزی
۹	J	مجموعه مواد اولیه	۱۹	P	مجموعه محصولات
	G	مجموعه مراکز انبار و دسته‌بندی			

جدول ۲: لیست پارامترهای مدل

#	نماد	توضیح پارامتر
۱	$Fa_{h,t,p}$	هزینه راه‌اندازی تولید محصول p و ظرفیت h در دوره t
۲	$Fw_{h,t}$	هزینه راه‌اندازی انبار با ظرفیت h در دوره t
۳	$Fd_{h,t}$	هزینه راه‌اندازی دمونتاز با ظرفیت h در دوره t
۴	$Fr_{h,t}$	هزینه راه‌اندازی تعمیرگاه با ظرفیت h در دوره t
۶	$Fq_{h,t}$	هزینه راه‌اندازی بازیافت با ظرفیت h در دوره t
	$Fg_{h,t}$	هزینه راه‌اندازی مرکز انبار و دسته‌بندی با ظرفیت h در دوره t
۷	$Ds_{b,e}$	فاصله بین تسهیلات e و b
۸	$C_{j,t}$	هزینه حمل ماده اولیه j در دوره t
۹	$C_{t,p}$	هزینه حمل‌ونقل محصول در دوره t
۱۰	$Oc_{t,p}$	هزینه تولید محصول p در دوره t
۱۱	$Oci_{t,p}$	هزینه نگهداری محصول در دوره t
۱۲	$Ocd_{t,p}$	هزینه دمونتاز محصول در دوره t
۱۳	$Ocn_{t,p}$	هزینه تعمیر محصول در دوره t
۱۴	$Ocm_t$	هزینه انبار و دسته‌بندی پسماند ها در دوره t
۱۵	$Ps_{j,s,t}$	هزینه خرید مواد اولیه j در دوره t از تأمین‌کننده s
۱۶	$Pq_{j,t}$	قیمت فروش پسماند j در دوره t

۱۷	$Pz_{t,p}$	قیمت فروش محصول در دوره $t$
۱۸	$Pg_{t,p}$	قیمت خرید پسماند دارای کیفیت قابل تعمیر
۱۹	$Pm_{t,p}$	قیمت خرید پسماند دارای کیفیت غیر قابل تعمیر
۲۱	$Er_p$	نرخ انتشار یک کیلو گرم کربن به ازای تولید محصول با استفاده از تکنولوژی O (کیلو گرم)
۲۲	$Er_p$	نرخ انتشار کربن برای حمل محصول
۲۳	$Er_j$	نرخ انتشار کربن وسیله نقلیه کربن برای حمل مواد اولیه $j$
۲۴	$Rm_{j,p}$	تعداد مواد اولیه $j$ در محصول $p$
۲۵	$Ca_h$	ظرفیت تولید با ظرفیت $h$ (دستگاه)
۲۶	$Ca_h^i$	ظرفیت انبار با ظرفیت $h$ (مترمکعب)
۲۷	$Ca_h^d$	ظرفیت مرکز دمونتاز با ظرفیت $h$ (تن)
۲۸	$Ca_h^n$	ظرفیت مرکز تعمیر با ظرفیت $h$ (تن)
۳۰	$Ca_h^q$	ظرفیت مرکز بازیافت با ظرفیت $h$ (تن)
	$Ca_h^g$	ظرفیت مرکز انبار و دسته بندی پسماند با ظرفیت $h$ (تن)
۳۱	$Bu_t$	بودجه راه اندازی در دوره $t$
۳۲	$r$	نرخ تورم
۳۳	$\gamma_{j,p}$	درصد قطعات نوع $j$ قابل استفاده در پسماندهای غیر قابل تعمیر
۳۴	$\rho_{j,p}$	درصدی از قطعات $j$ در پسماندهای قابل تعمیر که باید تعویض شوند.
۳۵	$\lambda_p$	درصد پسماندها با قابل تعمیر
۳۷	$De_{t,z,p}$	تقاضای محصول مرکز توزیع $z$ در دوره $t$
۳۸	$Bn$	یک مقدار خیلی بزرگ
۳۹	$Re_{ta}$	نرخ مالیات انتشار کربن در پله $ta$
۳۷	$Alfa$	درصد پسماند های بازگشتی
۴۱	$Cu_{ta}$	سقف میزان انتشار در پله $ta$
۴۲	$Wp_p$	وزن محصول $p$ (تن)
۴۳	$Vp_p$	حجم محصول $p$ (متر مکعب)

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

جدول ۳: لیست متغیرهای مدل ریاضی

#	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
۲	$Ff_{f,h,t}^p$	۱ راه اندازی تولیدی $f$ برای تولید $p$ و ظرفیت $h$ در دوره $t$ ۰ در غیر این صورت
۳	$Q_{q,h,t}$	۱ راه اندازی باز یافتی $q$ با ظرفیت $h$ در دوره $t$ ۰ در غیر این صورت
۴	$Da_{d,h,t}$	۱ راه اندازی دمونتاز $d$ با ظرفیت $h$ در دوره $t$ ۰ در غیر این صورت
۵	$Rf_{n,h,t}$	۱ راه اندازی تعمیرگاه $n$ با ظرفیت $h$ در دوره $t$ ۰ در غیر این صورت
	$Sw_{g,h,t}$	۱ راه اندازی مرکز انبار و دسته بندی $g$ با ظرفیت $h$ در دوره $t$ ۰ در غیر این صورت
۹	$W_{ta,t}$	۱ پر شدن پله $ta$ در دوره $t$ ۰ در غیر این صورت
۱۱	$Xm_{j,s,f,t}$	میزان حمل مواد اولیه $j$ از تأمین کننده $s$ به تولیدی $f$ در دوره $t$
۱۲	$X_{s,f,t}^p$	میزان حمل و نقل محصولات بین تسهیلات در دوره $t$
۱۳	$Po_{f,o,t,p}$	میزان تولید کارخانه $f$ در دوره $t$ با تکنولوژی $o$
۱۴	$At_{ta,t}$	میزان انتشار در پله $ta$
۱۵	$Sn_{i,t}^p$	موجودی محصولات نو در انبار $i$ محصول $p$ در دوره $t$
۱۶	$Sh_{g,t}^p$	موجودی پسماند قابل تعمیر در انبار $g$ در دوره $t$

۱۷ موجودی پسماند غیر قابل تعمیر در انبار  $g$  در دوره  $t$   $Sm_{g,t}^p$

### ۱-۳-۱- مدل ریاضی

در این بخش تابع هدف و محدودیت‌های مدل ریاضی تعریف می‌شود

$$\min obj = Ntc + Enct \quad 1$$

$$Ntc = Tfc + Ttc + Toc + tpc - Ben \quad 2$$

$$Tfc = \sum_{t \in T} (1+r)^{-t} Fc_t \quad 3$$

مقدار تابع هدف برابر مجموع خالص هزینه‌ها به علاوه مجموع مالیات بر انتشار کربن در دوره‌های برنامه ریزی است. معادله 2 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 3 نشان می‌دهد مجموع هزینه راه‌اندازی برابر مجموع هزینه راه‌اندازی در هر دوره است.

$$Fc_t = \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} \sum_{h \in H} Ff_{f,h,t}^p Fa_{h,t}^p + \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} Wh_{i,h,t} Fw_{h,t} + \sum_{d \in D} \sum_{h \in H} Da_{d,h,t} Fd_{h,t} + \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} RF_{n,h,t} Fr_{h,t} + \sum_{g \in G} \sum_{h \in H} Fg_{h,t} Sw_{g,h,t} + \sum_{q \in Q} \sum_{h \in H} Q_{q,h,t} Fq_{h,t} \quad \forall t \in T \quad 4$$

معادله 4 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.

$$Ttc = \sum_{t \in T} (1+r)^{-t} \left[ \begin{aligned} & \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} C_{t,p} X_{f,i,t}^p Ds_{f,i} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} C_{t,p} X_{i,z,t}^p Ds_{z,i} + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} C_{t,p} X_{b,g,t}^p Ds_{b,g} + \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \sum_{i \in I} C_{t,p} X_{g,d,t}^p Ds_{g,d} + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} C_{t,p} X_{g,n,t}^p Ds_{g,n} + \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} C_{t,p} X_{n,i,t}^p Ds_{n,i} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} C_{j,t} X_{j,d,f,t} m_{j,d,f,t} Ds_{d,f} + \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{q \in Q} C_{j,t} X_{j,d,q,t} m_{j,d,q,t} Ds_{d,q} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} C_{j,t} X_{j,s,n,t} m_{j,s,n,t} Ds_{s,n} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} C_{j,t} X_{j,s,f,t} m_{j,s,f,t} Ds_{s,f} \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} C_{j,t} X_{j,n,q,t} m_{j,n,q,t} Ds_{n,q} \end{aligned} \right] \quad 5$$

معادله 5 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 دمونتاز، از مراکز تعمیر به انبار محصولات نو و هزینه حمل و نقل مواد اولیه از مراکز دمونتاز به کارخانه‌ها، از مراکز دمونتاز به مراکز بازیافت، از تامین کننده به تعمیرگاه‌ها، از تامین کنندگان به کارخانه‌ها و از مراکز تعمیر به مراکز بازیافت است.

$$Toc = \sum_{t \in T} (1+r)^{-t} \left[ \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} P_{f,t,p} Oc_{t,p} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} Oc_{d,t,p} X_{i,d,t,k}^p + \sum_{p \in P} \sum_{z \in Z} \sum_{i \in I} Oci_{t,p} (X_{i,z,t}^p + Sn_{i,t}^p) + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} Ocn_{t,p} X_{i,n,t}^p + \sum_{p \in P} \sum_{b \in B} \sum_{g \in G} Ocm_{t,p} (X_{b,g,t}^p + Sh_{g,t}^p + Sm_{g,t}^p) \right] \quad 6$$

معادله 6 هزینه عملیات را نشان می‌دهد که برابر مجموع هزینه‌های تولید، دمونتاز، تعمیر، انبار و دسته بندی پسماندها و هزینه انبارداری است. هزینه نگهداری در انبارها برابر با حاصل ضرب هزینه نگهداری هر دوره در مجموع محصولات ارسال شده به مراکز توزیع و موجودی محصولات نو است.

$$Tpc = \sum_{t \in T} (1+r)^{-t} \left[ \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} Ps_{j,s,t} Xm_{j,s,f,t} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} Ps_{j,s,t} Xm_{j,s,n,t} + \sum_{p \in P} \sum_{b \in B} \sum_{g \in G} Pg_{t,p} \lambda_p X_{b,g,t}^p + \sum_{p \in P} \sum_{b \in B} \sum_{g \in G} Pm_{t,p} (1-\lambda_p) X_{b,g,t}^p \right] \quad 7$$

معادله 7 هزینه خرید مواد اولیه را نشان می‌دهد که بخش اول و دوم آن مجموع هزینه خرید مواد اولیه برای واحدهای تولیدی و تعمیرگاه‌ها است و بخش دوم هزینه خرید پسماندها را نشان می‌دهد.

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

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

$$\begin{aligned}
Ten_t = & \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} Er_{k,p} X_{f,i,t}^p Ds_{f,i} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} Er_{k,p} X_{i,z,t}^p Ds_{i,z} + \\
& \sum_{p \in P} \sum_{b \in B} \sum_{g \in G} Er_{k,p} X_{b,g,t}^p Ds_{b,g} + \sum_{p \in P} \sum_{g \in G} \sum_{d \in D} Er_{k,p} X_{g,d,t}^p Ds_{g,d} + \\
& \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{g \in G} Er_{k,p} X_{g,n,t}^p Ds_{g,n} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} Er_{k,p} X_{n,i,t}^p Ds_{n,i} + \\
& \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \sum_{j \in J} Er_{k,j} Ds_{n,q} Xm_{j,n,q,t} + \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} Er_{k,j} Xm_{j,d,f,t} Ds_{d,f} + \\
& \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{q \in Q} Er_{k,j} Xm_{j,d,q,t} Ds_{d,q} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} Er_{k,j} Xm_{j,s,n,t} Ds_{s,n} + \\
& \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{j \in J} Er_{k,j} Ds_{s,f} Xm_{j,s,f,t}
\end{aligned} \quad \forall t \in T \quad 10$$

$$Pen_t = \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} Er_p P_{f,t,p} \quad \forall t \in T \quad 11$$

معادله 8 مجموع سود ناشی از فروش محصولات و پسماندها را نشان می‌دهد. معادله 9 میزان انتشار کربن را نشان می‌دهد که برابر با مجموع انتشار کربن در مراکز تولیدی و حمل‌ونقل است. معادله 10 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 11 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 13-17 محدودیت‌های خطی سازی تابع مالیات انتشار کربن را نشان می‌دهد همچنین محدودیت 12 مجموع مالیات انتشار کربن را نشان می‌دهد که با نرخ تورم جمع شده اند.

$$\sum_{s \in S} Xm_{j,s,f,t} + \sum_{d \in D} Xm_{j,d,f,t} = \sum_{p \in P} Rm_{j,p} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{f,i,t}^p \quad \forall j \in J, f \in F, t \in T \quad 18$$

محدودیت 18 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.

$$\sum_{f \in F} X m_{j,d,f,t+1} = \sum_{p \in P} \gamma_j^p R m_{j,p} \sum_{g \in G} X_{g,d,t}^p \quad \forall j \in J, d \in D, t \in T \quad 19$$

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

$$\sum_{q \in Q} X m_{j,d,q,t+1} = \sum_{p \in P} (1 - \gamma_j^p) R m_{j,p} \sum_{i \in I} X_{g,d,t}^p \quad \forall j \in J, d \in D, t \in T \quad 21$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{d \in D} X m_{j,d,q,1} = 0 \quad \forall q \in Q \quad 22$$

محدودیت‌های 19 و 21 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 و محدودیت 22 بیان میکند که در دوره اول هیچ محصولی برای مرکز بازیافت ارسال نمی‌شود و محدودیت 22 بیان می‌کند که در دوره اول هیچ پسماندی برای مراکز بازیافت ارسال نمی‌شود.

$$\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} X_{g,n,t}^p = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} X_{n,i,t+1}^p \quad \forall n \in N, t \in T \quad 23$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in I} X_{n,i,1}^p = 0 \quad \forall n \in N \quad 24$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{s \in S} X m_{j,s,n,t} = \sum_{p \in P} \rho_{j,p} R m_{j,p} \sum_{i \in I} X_{n,i,t}^p \quad \forall n \in N, t \in T, j \in J \quad 25$$

محدودیت‌های 23 و 25 تعادل جریان در تعمیرگاه را نشان می‌دهد که میزان خروجی هر دوره برابر میزان ورودی دوره قبل است.

$$\sum_{f \in F} X_{f,i,t}^p + \sum_{n \in N} X_{n,i,t}^p + S n_{i,t-1}^p = \sum_{z \in Z} X_{i,z,t} + S n_{i,t}^p \quad \forall t \in T, i \in I, p \in P \quad 26$$

$$\sum_{g \in G} X_{g,n,t}^p + S h_{g,t}^p = \lambda_p \sum_{b \in B} \sum_{g \in G} X_{b,g,t}^p + S h_{g,t-1}^p \quad \forall t \in T, g \in G, p \in P \quad 27$$

$$\sum_{d \in D} X_{g,d,t}^p + S l_{g,t}^p = (1 - \lambda_p) \sum_{b \in b} X_{b,g,t}^p + S l_{g,t-1}^p \quad \forall t \in T, g \in G, p \in P \quad 28$$

محدودیت ۲۶ 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 ۲۷ و ۲۸ تعادل جریان مراکز انبار و دسته بندی را نشان می‌دهد.

$$\sum_{i \in I} X_{f,i,t}^p \leq \sum_{h \in H} \sum_{v=0}^t Ff_{f,h,v}^p Ca_{h,p} \quad \forall f \in F, t \in T, p \in P \quad 29$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Ff_{f,h,t}^p \leq 1 \quad \forall f \in F \quad 30$$

معادله ۲۹ محدودیت ظرفیت واحدهای تولیدی را نشان می‌دهد و محدودیت ۳۰ تضمین می‌کند که واحد تولید تنها با یک سطح تولید، برای یک نوع محصول و در یک دوره راهاندازی می‌شود.

$$\sum_{p \in P} \sum_{z \in Z} Vp_p X_{i,z,t}^p + \sum_{p \in P} Vp_p Sn_{i,t}^p \leq \sum_{h \in H} \sum_{g=0}^t Wh_{i,h,g} Ca_h^i \quad \forall i \in I, t \in T \quad 31$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Wh_{i,h,t} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad 32$$

معادله ۳۱ محدودیت ظرفیت انبارها را نشان می‌دهد. محدودیت ۳۲ تضمین می‌کند که انبار تنها با یک سطح تولید و در یک دوره راهاندازی شود.

$$\sum_{p \in P} \sum_{b \in B} Vp_p X_{b,g,t}^p + \sum_{p \in P} Vp_p Sh_{g,t}^p + \sum_{p \in P} Vp_p Sm_{g,t}^p \leq \sum_{h \in H} \sum_{v=0}^t Sw_{g,h,v} Ca_h^g \quad \forall g \in G, t \in T \quad 33$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Sw_{g,h,t} \leq 1 \quad \forall g \in G \quad 34$$

معادلات ۳۳ و ۳۴ محدودیت های ظرفیت تسهیلات انبار و دسته بندی پسماندها هستند.

$$\sum_{p \in P} \sum_{g \in G} Wp_p X_{g,d,t}^p \leq \sum_{h \in H} \sum_{g=0}^t Ca_h^d Da_{d,h,g} \quad \forall d \in D, t \in T \quad 35$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Da_{d,h,t} \leq 1 \quad \forall d \in D \quad 36$$

معادله ۳۵ ، محدودیت ظرفیت مرکز دمونتاز را نشان می‌دهد واحد ظرفیت مراکز دمونتاز تن می‌باشد به همین دلیل مقدار محصولات در وزن آنها ضرب می‌شود و محدودیت ۳۶ تضمین می‌کند که واحد دمونتاز تنها با یک سطح ظرفیت و در یک دوره راهاندازی شود.

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in I} Wp_p X_{n,i,t}^p \leq \sum_{h \in H} \sum_{g=0}^t Ca_h^n Rf_{n,h,g} \quad \forall n \in N, t \in T \quad 37$$



$$\sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Rf_{n,h,t} \leq 1 \quad \forall n \in N \quad 38$$

معادله ۳۷ محدودیت ظرفیت تعمیرگاه‌ها را نشان می‌دهد واحد ظرفیت مراکز نوسازی تن می‌باشد به همین دلیل مقدار محصولات در وزن آن‌ها ضرب می‌شود و محدودیت ۳۸ تضمین می‌کند که تعمیرگاه تنها با یک سطح ظرفیت و در یک دوره راه‌اندازی شود.

$$\sum_{d \in D} \sum_{j \in J} Wp_j X_{m_{j,d,q,t}} + \sum_{n \in N} \sum_{j \in J} Wp_j X_{m_{j,n,q,t}} \leq \sum_{h \in H} \sum_{g=0}^t Ca_h^q Q_{q,h,g} \quad \forall q \in Q, t \in T \quad 39$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{t \in T} Q_{q,h,t} \leq 1 \quad \forall q \in Q \quad 40$$

معادله ۳۹ محدودیت ظرفیت مراکز بازیافت را نشان می‌دهد. واحد ظرفیت مراکز بازیافت، تن می‌باشد به همین دلیل مقدار محصولات در وزن آن‌ها ضرب می‌شود محدودیت ۴۰ تضمین می‌کند که واحد بازیافت تنها با یک سطح ظرفیت و در یک دوره راه‌اندازی شود.

$$Fc_t \leq Bu_t + \sum_{g=0}^{t-1} (1+r)^g (Bu_g - Fc_g) \quad \forall t \in T \quad 41$$

معادله ۴۱ محدودیت بودجه هزینه راه‌اندازی را نشان می‌دهد که میزان هزینه در هر دوره باید کم‌تر از مجموعه بودجه دوره جاری و باقی‌مانده بودجه‌ها دوره قبل باشد.

$$\sum_{i \in I} X_{i,z,t}^p \leq De_{t,z,p} \quad \forall t \in T, z \in Z, p \in P \quad 42$$

$$\sum_{g \in G} X_{b,g,t}^p \leq Be_{t,b,p} \quad \forall t \in T, b \in B, p \in P \quad 43$$

معادله ۴۲ برآورد شدن تقاضا در هر کدام از توزیع‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. معادله ۴۳ میزان بازگشت کل پسماندها را نشان می‌دهد.

$$Wh_{i,h,t}, Ff_{f,h,o,t}^p, Q_{q,h,t}, Da_{d,h,t}, Rf_{n,h,t}, Rm_{m,h,t}, W_{ta,t} \in (0,1) \quad 44$$

$$X_{m_{j,s,f,t}}, X_{s,f,t}^p, Po_{f,o,t,p}, Sn_{i,t}^p, Sh_{i,t}^p, Sm_{i,t}^p, Sl_{i,t}^p \in Z^+ \quad 45$$

$$At_{ta,t} \in R^+ \quad 46$$

محدودیت‌های ۴۴ محدودیت باینری بود محدودیت‌ها را تعیین می‌کند و محدودیت ۴۵ محدودیت متغیرهای عدد صحیح است و محدودیت ۴۶ محدودیت متغیرهای اعداد طبیعی است.



## منابع و مراجع

- [١] 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
- [٢] A. P. Barbosa-Povoa, and A. Q. Novais, "Modelling a recovery network ,M. I. Gomes for WEEE: A case study in Portugal," *Waste Management*, vol. 31, no. 7, pp. 1645-1660, 2011
- [٣] 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
- [٤] V. Ghisolfi, G. d. L. D. Chaves, R. R. Siman, and L. H. Xavier, "System dynamics laptops in Brazil: A perspective applied to closed loop supply chains of desktops and for social inclusion of waste pickers," *Waste management*, vol. 60, pp. 14-31, 2017
- [٥] 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
- [٦] 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
- [٧] 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. 16, no. 1, pp. 60-79, 2017
- [٨] S. Qiang and X.-Z. Zhou, "Robust reverse logistics network design for the waste of uncertainty," *Journal of electrical and electronic equipment (WEEE) under recovery environmental biology*, vol. 37, no. 5, p. 1153, 2016
- [٩] 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
- [١٠] 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
- [١١] 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
- [١٢] 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
- [١٣] 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
- [١٤] 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

- 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 [۱۵]
- 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. 10, pp. 1405-1425, 2013 [۱۶]
- 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 [۱۷]