

مدیریت تولید و عملیات، دوره هفتم، شماره (۲)، پیاپی (۱۳)، پاییز و زمستان ۱۳۹۵
دریافت: ۹۲/۵/۹ پذیرش: ۹۳/۷/۲۸
صص: ۱۳۷-۱۵۲

طراحی مدل توسعه پایدار بازیافت زباله‌های الکترونیکی

سجاد شکوهیار^{۱*}، عیسی اکبری^۲

۱- استادیار، گروه مدیریت فن‌آوری اطلاعات - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت MBA-عملیات، دانشکده مهندسی صنایع- دانشگاه سمنان - سمنان - ایران

چکیده

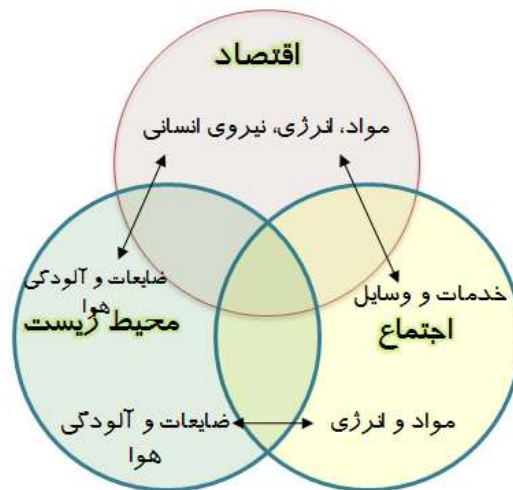
زباله تجهیزات الکترونیکی و الکترونیکی یکی از بزرگ‌ترین جریان‌های روبه‌رشد زباله در مقیاس جهانی. این زباله‌ها حاوی مواد خطرناکی هستند که اگر به‌درستی مدیریت نشوند، ممکن است بر محیط‌زیست و سلامت انسان اثر بگذارند. بنابراین برای حفاظت از محیط‌زیست نیاز است زباله‌های الکترونیکی به سمت یک فرایند پایان عمر مناسب مانند بازیافت و دفع، هدایت شوند. هدف این مقاله طراحی شبکه بازیافت زباله‌های الکترونیکی مبتنی بر اهداف توسعه پایدار، در سطح کشوری است که در آن مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی مدنظر هستند. مدل توسعه‌یافته بهینه‌سازی شبیه‌سازی به‌منظور تعیین بهترین مکان برای کارخانه‌های بازیافت برای مدیریت کلی زباله‌های الکترونیکی در ایران استفاده شده است؛ به‌طوری‌که دولت بتواند هم‌زمان یک هم‌پوشانی بین مسائل زیست‌محیطی، اثرات اجتماعی و اقتصادی ایجاد کند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی شبیه‌سازی، توسعه پایدار، زباله‌های الکترونیکی، لجستیک معکوس.

۱- مقدمه

همه جوامع در حال و آینده فراهم می‌کنند، لذا پایداری با سیستم‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در ارتباط کامل است. توسعه پایدار بدون تردید یک مفهوم پیچیده است که ابعاد مختلفی را در بر می‌گیرد. اما اغلب محققان توسعه پایدار را در سه محور اصلی زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی بررسی می‌کنند. شکل (۱) ارتباط سه بعد توسعه پایدار را نشان می‌دهد.

نیاز به تغییر و تحول و توسعه از عمده‌ترین نیازهای فطری انسان است و در طول تاریخ همراه با رشد فکری، فرهنگی، ارتقای سطح علمی و اجتماعی بشری، این نیاز به توسعه نیز افزایش می‌یابد. توسعه پایدار با کیفیت زندگی در یک جامعه در ارتباط کامل است و از آنجا که سیستم‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، جامعه را می‌سازند و زندگی سالم، ایمن و لذت‌بخشی را برای



شکل (۱) ارتباط میان سه بعد توسعه پایدار

زباله تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی (WEEE)^۲ یکی از بزرگ‌ترین جریان‌های روبه‌رشد زباله در مقیاس جهانی است. بنابراین برای حفاظت از محیط‌زیست نیاز است که زباله‌های الکترونیکی به سمت یک فرایند پایان عمر مناسب مانند بازیافت و دفع هدایت شوند. برخلاف بازیافت آسان و مناسب زباله‌های فلزی، بازیافت زباله‌های الکترونیکی بسیار پیچیده‌تر است؛ زیرا محصولات الکترونیکی که به پایان عمر خود می‌رسند، حاوی مواد مختلف زیادی هستند که به‌طور یکپارچه به یکدیگر متصل

توجه جداگانه به این سه بعد و بررسی مشکلات جوامع به طور جداگانه و ارائه راه‌حل برای مشکلات موجود در هر جنبه می‌تواند مشکلات زیادی را ایجاد کند.

به‌طور مثال، توجه به بعد اقتصادی کارخانه‌های تولیدی می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری را بر محیط‌زیست به‌دلیل تولید پسماندها و ضایعات شیمیایی بگذارد. لذا باید به هم‌پوشانی مسائل در این سه بعد در توسعه پایدار توجه کرد (ساهو^۱ و همکاران، ۲۰۰۵).

و مجاز مثل سازمان حفاظت از محیط‌زیست (EPO)^۶ ایران وجود ندارد. تنها یک مکان دفع زباله‌های الکترونیکی با ظرفیت ۰/۸ تن در روز موجود است که به‌وسیله بخش عمومی نصب شده است (2011) (EPO). بنابراین کشور پتانسیل زیادی برای نصب و راه‌اندازی امکانات و تسهیلات جدید جهت چاره‌اندیشی برای لوازم الکتریکی و الکترونیکی در پایان عمر مفیدشان (EOL)^۷ دارد. در بخش بعدی این مقاله، کارهای منتشرشده برای مدل‌سازی شبکه لجستیک معکوس در سطح ملی و بازیافت زباله الکترونیکی برای کشورهای مختلف مرور می‌شود. بخش ۳ مربوط به طراحی مدل مسئله با توجه به اهداف توسعه پایدار است. بخش ۴ به حل مدل و تحلیل نتایج می‌پردازد و سرانجام، بخش ۵ به نتایج اختصاص دارد.

۲- مرور ادبیات

در سال‌های اخیر محققان توجه زیادی به طراحی توسعه پایدار شبکه لجستیک معکوس داشتند (آنگاندو و همکاران، ۲۰۱۱). با این حال کارهای اندکی روی طراحی شبکه لجستیک معکوس برای همه گروه‌های زباله‌های الکترونیکی با توجه به سه محور توسعه پایدار در سطح ملی منتشر شده است. دلیل اصلی مرور این ادبیات تشخیص و درک نقش‌های اصلی کارهای موجود به منظور متمایزسازی این تحقیق از آن دسته مطالعات است.

تقی‌پور و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیق خود داده‌ها را برای ۸ گروه از زباله‌های الکترونیکی خلاصه کردند و توسعه مسئولیت‌پذیری تولیدکننده

شده‌اند (تانسکین^۳، ۲۰۱۳). با توجه به اجتناب‌ناپذیر بودن تولید زباله الکترونیکی توسط انسان در هر زمان، توجه به کنترل و ساماندهی آن وظیفه‌ای ملی و بااهمیت است.

امروزه برخی از دولت‌ها در تعدادی از کشورها از نظر مالی و سازمانی مسئولیت بازیافت محصولات خود را زمانی که عمر آن‌ها به پایان رسید، بر عهده دارند. این موضوع با اصطلاح طراحی شبکه ملی لجستیک معکوس (RL)^۴ پدیدار شده است (منصور و زارعی، ۲۰۰۸). مرور و بازبینی در طراحی شبکه لجستیک معکوس عمدتاً به دو دسته تقسیم می‌شوند: به‌حداقل رساندن هزینه‌ها و کمینه‌کردن اثرات زیست‌محیطی. تحقیقات کمی برای تلفیق این دو رویکرد وجود دارد. بخش اجتماعی توسعه پایدار در شبکه‌های لجستیک معکوس همواره در ادبیات نادیده گرفته شده است (بلوم هاف روارد^۵ و همکاران، ۲۰۰۴). در حال حاضر حجم زیادی از زباله‌های الکترونیکی تولیدی به‌طور مستقیم و بدون هیچ بهبودی به محل‌های دفن زباله می‌روند. رسیدن به قابلیت توسعه پایدار در شبکه بازیافت زباله‌های الکترونیکی مستقیماً به مقدار کلی زباله‌های الکترونیکی تولیدشده بستگی دارد. برای بهبود این سرعت سریع و غیرقابل‌کنترل رشد زباله‌های الکترونیکی، به دولت ایران توصیه شده است تا شبکه لجستیک معکوس مؤثر و کارآمدی را طراحی کنند (تقی‌پور و همکاران، ۲۰۱۱). نگرانی اصلی، کمبود یک سیستم جمع‌آوری و بازیافت کارآمد است. در حال حاضر هیچ بخش‌نامه‌ای برای جمع‌آوری و دفع ایمن زباله‌های الکترونیکی در کل سازمان‌های قانونی

(EPR)^۸ را در بین سازمان‌های ایرانی مطالعه کردند. شکوهار و منصور (۲۰۱۲) یک مدل به‌منظور تعیین بهترین مکان برای مراکز جمع‌آوری و همچنین کارخانه‌های بازیافت در ایران طراحی کردند. هیکس و همکاران^۹ (۲۰۰۵) وضعیت بازیافت و دفع پسماندهای الکترونیکی و اثرات آن‌ها بر محیط‌زیست، بهداشت و اقتصاد چین را بررسی کردند. کانگ و چونانگ^{۱۰} (۲۰۰۵) در مطالعات خود به بازیافت پسماندهای الکترونیکی و بررسی زیرساخت‌ها و فن‌آوری‌ها در ایالات متحده آمریکا پرداختند. همچنین در این مطالعه روش‌های جمع‌آوری و برنامه‌های بازیافت پسماندهای الکترونیکی بررسی شد. چانگ و همکاران^{۱۱} (۲۰۰۶) روی سیستم لجستیک برای بازیافت ضایعات الکترونیکی در چین متمرکز بودند. مدل MILP^{۱۲} بر اساس مدل مکان مناسب انبار توسعه یافت و یک استان در چین مطالعه شد. کی روگا و همکاران^{۱۳} (۲۰۰۸) روشی را برای انتخاب بهترین محل برای کارخانه‌های بازیافت زباله‌های الکترونیکی در اسپانیا بررسی کردند. این مطالعه را بنیاد ECOLEC که به‌وسیله انجمن‌های تجاری راه‌اندازی شده است انجام داد تا بخش تولیدی و واردکنندگان وسایل الکتریکی و الکترونیکی را به نمایش گذارد. نویسندگان این مطلب را به‌عنوان یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)^{۱۴} تعریف کرده‌اند که سه معیار اصلی و مهم انتخاب شده اقتصاد، زیربنای اقتصادی و قانون می‌باشند. هدف اصلی مطالعه، پیشنهاد ساختار بهینه‌ای در قوانین کارخانه‌های بازیافت نبود بلکه پیشنهاد مجموعه‌ای از

گزینه‌های خوب برای مکان‌های بالقوه جمع‌آوری بود. روزیس و همکاران^{۱۵} (۲۰۰۸) روش تصمیم‌گیری چندمعیاره را برای انتخاب بهترین سناریوی حل مشکل زباله‌های الکترونیکی مبتنی بر اهداف توسعه پایدار در جزیره قبرس به کار گرفتند. دوازده استراتژی برای حل این موضوع که مبتنی بر معیارهای فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی بودند، انتخاب شدند. گرونو و گوبی^{۱۶} (۲۰۰۹) رویکردی مبتنی بر مدل‌سازی MILP برای بهینه‌سازی محل مراکز جمع‌آوری زباله‌های الکترونیکی در دانمارک فراهم ساختند. مدل توسعه‌یافته به سازمان‌های دولتی در واگذاری طرح‌های جمع‌آوری به شهرداری‌هایی که مصرف‌کنندگان زباله‌ها را به آن‌ها تحویل می‌دهند، کمک می‌کند. کمبرینی و همکاران^{۱۷} (۲۰۱۰) مدلی عمومی و کلی برای بهینه‌سازی تعداد وسایل نقلیه موردنیاز، حداکثر ظرفیت پرشدن آن‌ها و مطلوبیت زمان‌های کاری این وسایل برای حل و فصل مسئله زباله‌های الکترونیکی با توجه به اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی در شمال ایتالیا، توسعه دادند. اثرات زیست‌محیطی به‌وسیله روش ارزیابی چرخه عمر (LCA)^{۱۸} کمی شد و نتایج در یک مدل شبیه‌سازی به کار گرفته شدند. آکیلز و همکاران^{۱۹} (۲۰۱۰a) مدل MILP را به‌عنوان ابزار پشتیبانی از تصمیم برای سیاست‌گذاران ارائه کردند تا شبکه لجستیک معکوس محصولات الکتریکی و الکترونیکی را در یونان بهینه کنند. مدل توسعه‌یافته هزینه‌های کلی لجستیک که شامل هزینه‌های متغیر حمل‌ونقل و هزینه متغیر و ثابت برای ایجاد امکانات

این راه‌حل^{۲۰} محل جمع‌آوری عادی، محل جمع‌آوری هاب، محل فرآوری عادی، محل فرآوری هاب و محلی برای جمع‌آوری موقت به وسیله مطلوب‌سازی مدل MILP تعیین شدند. گومز و همکاران^{۲۴} (۲۰۱۱) یک مدل MILP عمومی را برای نشان دادن شبکه بازیافت زباله‌های الکترونیکی در پرتغال پیشنهاد دادند. در مدل آن‌ها، بهترین محل‌ها برای جمع‌آوری و دسته‌بندی کردن مراکز به‌طور هم‌زمان انتخاب شدند. اولاً ملا و همکاران^{۲۵} (۲۰۱۴) در مطالعات خود دستورالعمل توسعه و اجرای زیرساخت‌های بازیافت زباله‌های الکترونیکی در فنلاند را تشریح کردند. آن‌ها همچنین چالش‌های مدیریت اثر بخش سیستم بازیافت زباله الکترونیکی در فنلاند را بررسی کردند. راموس و همکاران^{۲۶} (۲۰۱۴) نگرانی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی را در برنامه‌ریزی سیستم‌های جمع‌آوری زباله‌های قابل بازیافت بررسی کردند. مطالعه آن‌ها برای شبکه‌های لجستیک با انبارهای متعدد که در آن محصولات مختلف جمع‌آوری می‌شوند انجام شد. همچنین در آن تحقیق شش سناریو درباره مناطق مختلف سرویس‌دهی و توابع هدف (حداقل کردن فاصله و میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن) مطالعه شد.

براساس مرور ادبیات انجام‌شده، مشاهده می‌شود که تاکنون تحقیق جامع و به‌روزی درخصوص طراحی شبکه بازیافت انواع مختلف زباله‌های محصولات الکترونیکی انجام نشده است. در این تحقیق سعی خواهد شد چنین شبکه‌ای برای این دسته از زباله‌های الکترونیکی مدل‌سازی و سپس با جمع‌آوری داده و پیاده‌کردن در مدل بهینه‌سازی شود.

واسطه است را کمینه می‌کند. در تحقیق دیگری از آکیلز و همکاران (۲۰۱۰b) محل تأسیسات بازیافت زباله‌های الکترونیکی در یونان بررسی شد. روش چندمعیاره در چهارچوب تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین محل‌های جمع‌آوری جایگزین زباله‌های الکترونیکی اقتباس شد. سه هدف در مدل توسعه‌یافته در نظر گرفته شد: فواید و مزایای اجتماعی (توسعه محلی، جمعیت بیکار)، اقتصاد (ارزش زمین و وضعیت مالی جمعیت محلی) و معیارهای قابلیت دسترسی (قابلیت دسترسی به محل و فاصله از: نزدیک‌ترین بندر، پایتخت منطقه و دیگر امکانات موجود). شین فنگ و همکاران^{۲۰} (۲۰۱۰) یک شبکه لجستیک معکوس برای مدل‌سازی زباله‌های الکترونیکی در استان گوانگ‌ژو در چین پیشنهاد کردند. در این شبکه، تابع هدف، کمینه‌کردن هزینه‌های کلی حمل‌ونقل بود. به این منظور مدل برنامه‌ریزی خطی (LP)^{۲۱} برای تعیین بهترین مراکز جمع‌آوری زباله‌های الکترونیکی به کار گرفته شد. سپس از مدل شبیه‌سازی برای تحلیل نتایج مدل LP استفاده شد. کالانا^{۲۲} (۲۰۱۰) به بررسی روش‌های دفع پسماندهای الکترونیکی در مالزی پرداخت. اطلاعات به‌دست‌آمده نشان داد که مقدار تجهیزات الکترونیکی ذخیره‌شده و تجهیزات الکترونیکی دسته‌دوم فروخته‌شده به ترتیب حدود ۴۸٪ و ۳۷٪ بود و فقط ۲۷٪ زباله‌های الکترونیکی بازیافت می‌شدند. آساواپکی و وانگست سنکرون^{۲۳} (۲۰۱۱) یک راه‌حل برای طراحی زیرساخت‌های اقتصادی تولید معکوس در ایالت تگزاس برای زباله تلویزیون‌ها، CPUها و مانیتورها پیشنهاد کردند. در

۳- طراحی مدل مسئله

به منظور مدل سازی مسئله مطرح شده در بخش پیشین، ابتدا انواع زباله های الکتریکی و الکترونیکی بررسی و دسته بندی شده اند. براساس تحقیقی که هوسیمان و همکاران^{۲۷} (۲۰۰۷) انجام داده اند این دسته از زباله ها در ۱۳ گروه دسته بندی شده اند که براین اساس باتوجه به توانمندی جمع آوری داده از مراکز مختلف ۱۰ گروه زباله الکترونیکی لحاظ شده است (جدول ۱). به منظور طراحی شبکه بازیافت این دسته از محصولات، فرآیندهای اصلی زیر در نظر گرفته شده است (فلایشمن^{۲۸} و همکاران، ۲۰۰۳):

- حمل و نقل: شامل حمل مواد جمع آوری شده به مراکز بازیافت است.

- جداسازی و بازیافت اولیه: در این فرایند قطعات محصولات الکتریکی دمونتاژ می شود و براساس نوع دسته بندی می شود.

- بازیافت: مواد و قطعات محصولات با توجه به نوع آن در کارخانه های بازیافت می شوند.

بدین ترتیب که ابتدا شبکه بازیافت براساس نوع زباله های الکترونیکی تولیدی و حجم زباله ها طراحی خواهد شد. به منظور پیاده کردن مدل، داده های مربوط به زباله های الکترونیکی در ایران جمع آوری و سپس با استفاده از ابزار بهینه کردن، شبیه سازی مدل طراحی شده، بهینه خواهد شد.

در این تحقیق فرضیات زیر لحاظ شده است که به تفصیل در ادامه نحوه مدل سازی و جزئیات آن ها توضیح داده خواهد شد:

- چهار نوع کارخانه برای بازیافت زباله های الکتریکی در نظر گرفته شده است.

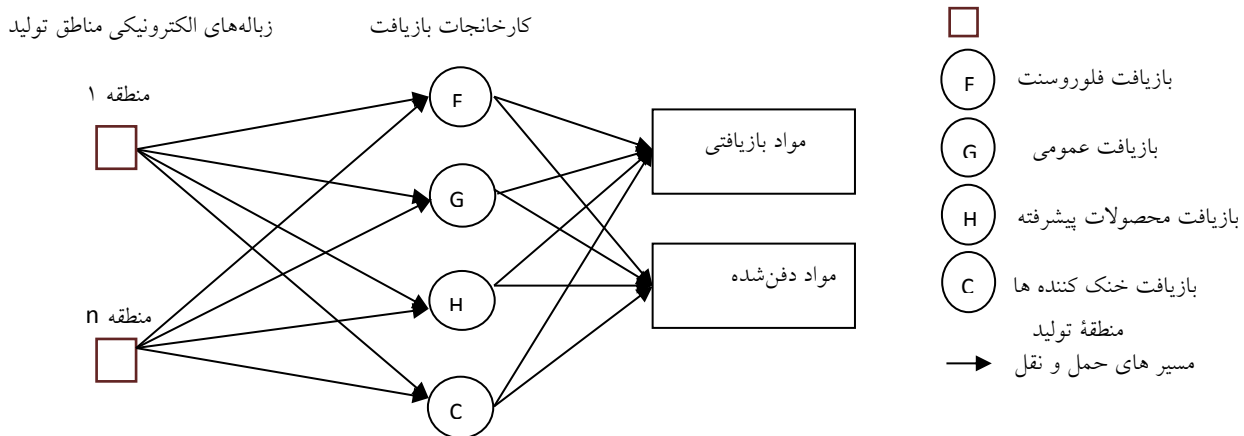
- اثرات زیست محیطی مربوط به حمل و نقل و آلودگی ناشی از کارخانه های بازیافت، مدل شده است.

- سه شاخص اجتماعی برای بررسی اثرات اجتماعی در مدل لحاظ شده است.

- مراکز استان ها به عنوان مبدأ تولید زباله های الکترونیکی و مبانی سنجش مسافت حمل در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) دسته بندی زباله های الکتریکی و الکترونیکی

| شماره | عنوان دسته | شماره | عنوان دسته |
|-------|--|-------|---------------------------------|
| ۱ | وسایل بزرگ خانگی، وسایل مخابراتی | ۶ | وسایل الکترونیکی مصرفی |
| ۲ | خنک کننده ها | ۷ | تلویزیون و مانیتورهای CRT |
| ۳ | وسایل کوچک خانگی، وسایل بازی و تجهیزات ورزشی | ۸ | تلویزیون های Flat و LCD |
| ۴ | تجهیزات پزشکی | ۹ | وسایل روشنایی، لامپ |
| ۵ | تجهیزات IT و وسایل ارتباطی به استثنا CRT | ۱۰ | ابزارآلات الکتریکی و الکترونیکی |



شکل (۲) شبکه بازیافت زباله‌های الکترونیکی

تا ۱۳۹۲ محاسبه شده است و این داده‌ها به منظور محاسبه نرخ تولید زباله‌های الکترونیکی در مدل استفاده شده‌اند.

- کارخانه‌های بازیافت: در مدل فرض شده است که ظرفیت کارخانه‌های بازیافت ۲۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۲۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ تن در سال طراحی شود. این ظرفیت‌ها بر اساس استعلام انجام شده از سازندگان این کارخانه‌های در دنیا در مدل لحاظ شده است. فرض شده است این کارخانه‌های ۸ ساعت در روز و ۲۵۰ روز در سال فعال هستند.

- حمل و نقل: هزینه‌های حمل و نقل بر اساس هزینه حمل یک تن زباله و فواصل مراکز استان‌ها محاسبه شده است.

براساس این فرضیات و توضیحات داده شده در خصوص اهداف توسعه پایدار، در ادامه ابتدا پارامترها و متغیرهای مدل، به ترتیب در جداول (۲) و (۳) ارائه شده و سپس توابع هدف مدل بررسی شده طراحی شده است.

براین اساس شبکه بازیافت محصولات الکترونیکی به صورت شکل (۲) طراحی شده است. زباله‌های تولید شده جمع‌آوری و براساس نوع مواد تشکیل دهنده هر بخش، به کارخانه‌های بازیافت مختلف در سراسر کشور فرستاده شدند. این کارخانه‌های در چهار دسته طبقه‌بندی شده‌اند:

- بازیافت فلوروسنت
- بازیافت عمومی
- بازیافت محصولات پیشرفته
- بازیافت خنک‌کننده‌ها

با توجه به ترکیبات محصولات الکترونیکی و اطلاعات جمع‌آوری شده از مرکز آمار و گمرک ایران، فرضیات و اطلاعات زیر برای طراحی مدل در نظر گرفته شده است:

- در مدل طراحی شده فرض شده است کارخانه‌های بازیافت می‌توانند در مرکز هر استان بنا شوند. لذا ۳۱ استان کشور به‌عنوان مراکز پیشنهادی جمع‌آوری و بازیافت در مدل لحاظ شده است.

- نرخ تولید زباله‌های الکترونیکی از سال ۱۳۷۵

جدول (۲) اندیس‌ها و پارامترهای مدل

| | |
|---|--------------|
| اندیس منطقه تولید $i=1, \dots, I$ | I |
| اندیس کارخانه‌های بازیافت $l=1, \dots, L$ | L |
| اندیس دسته‌زباله تولیدشده $q=1, \dots, Q$ | Q |
| اندیس نوع کارخانه $s=1, \dots, S$ | S |
| اندیس ظرفیت کارخانه | H |
| درصد وزن ماده نوع q در انواع زباله‌ها | W_q |
| هزینه سالیانه راه‌اندازی کارخانه نوع s با ظرفیت h | C_S^H |
| کارخانه با ظرفیت h از نوع s | e_S^H |
| فاصله شهر i از محل کارخانه در محل l | $d_{i,l}$ |
| درصد ماده نوع r در زباله نوع q | $B_{r,q}$ |
| هزینه حمل یک تن زباله محصولات الکتریکی در هر کیلومتر | C^T |
| قیمت فروش ماده نوع r | O_r |
| اثر زیست‌محیطی بازیافت یک تن در کارخانه نوع s | EL_{sq} |
| متوسط قیمت خرید زباله نوع q | P_q |
| اثرات زیست‌محیطی حمل یک تن زباله در هر کیلومتر | EL^T |
| وزن نرمال‌شده شاخص اشتغال | W_{EM} |
| وزن نرمال‌شده شاخص آسیب به کارگران | W_{DTW} |
| وزن نرمال‌شده شاخص توسعه ملی و محلی | W_{NLD} |
| شاخص اشتغال کارخانه نوع s با ظرفیت h در محل l | EM_{sl}^h |
| شاخص آسیب به کارگران کارخانه نوع s با ظرفیت h در محل l | DTW_{sl}^h |
| شاخص توسعه ملی و محلی کارخانه نوع s با ظرفیت h در محل l | NLD_{sl}^h |

جدول (۳) متغیرهای مدل

| | |
|---|------------|
| مقدار ماده نوع q که از محل i به کارخانه نوع s حمل می‌شود. | X_{isq} |
| اگر ماده نوع q بتواند در کارخانه نوع s بازیافت شود یک، در غیر این صورت صفر. | V_{sq} |
| اگر کارخانه نوع s در محل l با ظرفیت h تأسیس شود یک، در غیر این صورت صفر. | V_{sl}^h |

۳-۱- اهداف اقتصادی

به منظور طراحی شبکه بازیافت انجام شود و هزینه‌های مربوط به حمل و نقل این مواد را پرداخت کرد.

در مدل توسعه داده شده، هدف اقتصادی حداکثر کردن سود شبکه است. براین اساس رابطه

زباله‌های محصولات الکترونیکی با توجه به مواد تشکیل دهنده خود پس از بازیافت، دارای ارزش اقتصادی فراوانی هستند. از طرفی به منظور بازیافت و استفاده مجدد از این مواد، باید سرمایه‌گذاری لازم

ریاضی این تابع هدف به صورت زیر خواهد بود:

(۱)

$$\begin{aligned} \text{Max } Z_1 = & \sum_{q=1}^Q \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S X_{isq} W_q O_r B_{rq} + \\ & - \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{q=1}^Q X_{isq} P_q - \sum_{s=1}^S \sum_{h=1}^H \sum_{l=1}^L C_s^h e_s^h V_{sl}^h \\ & - C^T \left[\sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{q=1}^Q X_{isq} d_{is} \right] \end{aligned}$$

در رابطه (۱) بخش اول مربوط به محاسبه سود ناشی از فروش مواد تشکیل دهنده کارخانه‌های بازیافت، بخش دوم مربوط به قیمت خرید زباله‌های الکترونیکی، بخش سوم مربوط به هزینه‌های احداث کارخانه‌های بازیافت و بخش آخر مربوط به هزینه‌های حمل و نقل میان مراکز تولید و کارخانه‌های است.

۳-۲- اهداف زیست محیطی

مقالات فراوانی تاکنون اثرات زیست محیطی شبکه بازیافت زباله‌های الکترونیکی را بررسی کرده‌اند (هوسیمان و همکاران، ۲۰۰۷). واگر و همکاران ترکیبی از جریان مواد و LCA را در یک شبکه بازیافت بررسی کردند. در این تحقیق با توجه به تنوع زباله‌های الکترونیکی و همچنین فرضیات مدل طراحی شده، از نرم‌افزار Simapro7.0 استفاده شده

است. بدین منظور اثرات زیست محیطی حمل یک تن زباله برای یک کیلومتر کمی شده است. همچنین اثرات زیست محیطی هر یک از کارخانه‌های به صورت مقایسه‌ای محاسبه شده است. براین اساس تابع ریاضی اثرات زیست محیطی شبکه بازیافت به صورت زیر خواهد بود:

(۲)

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{q=1}^Q X_{isq} d_{is} EL^T$$

رابطه (۲)، اثرات زیست محیطی حمل و نقل زباله‌ها را به کارخانه‌های بازیافت محاسبه می‌کند.

۳-۳- اهداف اجتماعی

همان‌طور که در مرور ادبیات نیز عنوان شد، مقالات اخیر تنها اثرات زیست محیطی و اقتصادی ناشی از شبکه بازیافت را مدل‌سازی کرده‌اند و تنها تعداد معدودی به مدل‌سازی اثرهای اجتماعی پرداخته‌اند (موریس و برون، ۲۰۰۴).^{۲۹} در این تحقیق مسئولیت اجتماعی در شبکه بازیافت و شاخص‌های مؤثر اجتماعی بر توسعه شبکه (کارتر و همکاران، ۲۰۰۲)^{۳۰} بررسی و نهایتاً شاخص‌های جدول (۴) انتخاب شده است:

جدول (۴) مسئولیت اجتماعی در شبکه بازیافت و شاخص‌های مؤثر بر توسعه شبکه

| شرح | شاخص |
|---|-----------------|
| هریک از کارخانه‌های و محل‌های بازیافت اثرهای اجتماعی متفاوتی از نظر تعداد شغل ایجاد شده دارند. بیکاری موجب کاهش رشد اجتماعی می‌شود و لذا شاخص مهمی در مسئولیت توسعه پایدار خواهد بود. | اشتغال |
| هریک از کارخانه‌های و محل‌های بازیافت اثرهای متفاوتی از نظر تولید مواد آلاینده که بر سلامت کارگران مؤثر است، دارند. | آسیب به کارگران |
| راه‌اندازی کارخانه‌های در محل‌های کمتر توسعه یافته موجب رشد و توسعه محلی منطقه مورد نظر خواهد شد. | توسعه محلی |

براساس این شاخص‌ها با استفاده از روش AHP و انجام مقایسات زوجی، وزن نسبی هریک از شاخص‌ها نسبت به شاخص دیگر در جدول (۵) محاسبه شده است.

جدول (۵) محاسبه وزن نسبی شاخص‌ها

| شاخص | وزن نرمال شده شاخص |
|-----------------|--------------------|
| اشتغال | ۰.۵۸/۴ |
| آسیب به کارگران | ۰.۲۸/۲ |
| توسعه محلی | ۰.۱۳/۴ |

ظرفیت کارخانه‌های بازیافت است. محدودیت شماره (۵) شرط تخصیص تنها یک ظرفیت به کارخانه‌های بازیافت را رعایت می‌کند. محدودیت (۶) شرایط صفرویک بودن متغیرهای صفرویک مدل را رعایت می‌کند.

۴- حل مدل و تحلیل نتایج

۴-۱- طراحی روش حل

براساس مدل طراحی شده در بخش پیشین، با توجه به قطعیت نداشتن موجود در نرخ ورود زباله‌های الکترونیکی و همچنین درصد تشکیل دهنده مواد هر یک از زباله‌ها، در این تحقیق از ترکیب روش‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی استفاده شده و مدل طراحی شده با استفاده از روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی حل شده است. ساختار روش حل استفاده شده در شکل (۳) نمایش داده شده است. همچنین در این مقاله از نرم‌افزار OptQuest که یک ابزار تجاری ARENA است و در قالب ابزار بهینه‌سازی این نرم‌افزار به کار می‌رود، استفاده شده است. اجزای این نرم‌افزار در شکل (۴) نمایش داده شده است. در نرم‌افزار گفته شده با ایجاد ارتباط با مدل شبیه‌سازی سعی شده است تابع هدف

براساس توضیحات داده شده، مدل ریاضی تابع هدف اجتماعی به صورت مدل (۳) خواهد بود:

$$\text{Max } Z_3 = \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H (W_{EM} EM_{sl}^h + W_{DTW} DTW_s^h$$

$$+ W_{NLD} NLD_{sl}^h) V_{sl}^h$$

رابطه (۳)، محاسبه اثرهای اجتماعی مربوط به احداث کارخانه‌های بازیافت است.

۴-۳- محدودیت‌های مدل

به منظور پیاده کردن مدل (۳) محدودیت‌های ذیل نیز به مدل اضافه شده است:

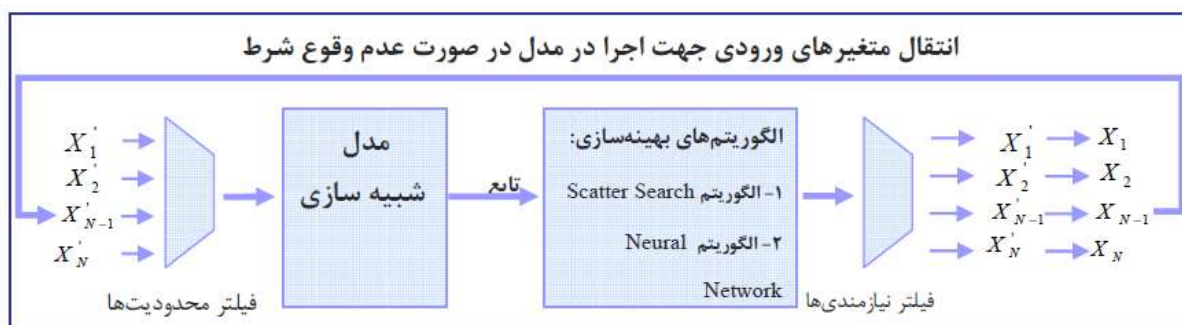
$$\sum_{i=1}^I \sum_{q=1}^Q X_{isq} \leq e_s^h V_s^h; \quad \forall s, h \quad (4)$$

$$\sum_{h=1}^H V_{sl}^h \leq 1; \quad \forall s, l \quad (5)$$

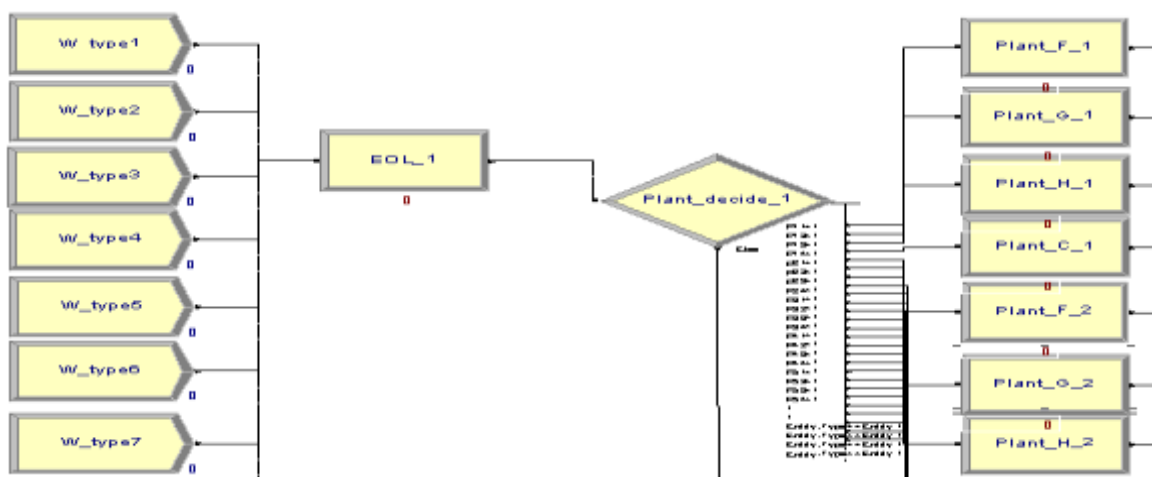
$V_{sl}^h \in (0,1)$
محدودیت شماره (۴) مربوط به محدودیت

(X'_i) به‌عنوان ورودی به مدل شبیه‌سازی وارد می‌شود و این چرخه تا وقوع شرط توقف ادامه می‌یابد. شکل (۵) مدل شبیه‌سازی شده را در نرم‌افزار ذکر شده نمایش می‌دهد.

تعیین شده برای مسئله بهبود داده شود. پس از دریافت خروجی (Y_i)، توسط نرم افزار OptQuest خروجی و متغیرهای ورودی (X_i) ارزیابی می‌شوند. سپس براساس ارزیابی انجام گرفته، پارامترهای جدید



شکل (۳) مدل بهینه‌سازی شبیه‌سازی توسعه یافته برای حل مسئله تشریح شده



شکل (۴) نمایش اجزای نرم‌افزار OptQuest

نهایت، پس از بازیافت مواد بازیافت شده به فروش می‌رسد.

۴-۲- اجرای مدل و تحلیل نتایج

همان‌طور که در بخش پیشین عنوان شد به‌منظور حل مدل از روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده شده است. بدین‌منظور، مدل برای ۶۰۰ بار اجرا شده

نقطه شروع مدل شبیه‌سازی، از مراکز استان‌ها است همان‌طور که عنوان شد، ۱۰ نوع زباله الکترونیکی براساس نرخ‌های مختلف تولید خواهد شد. سپس این زباله‌ها به یکی از کارخانه‌های بازیافت منتقل شده و در آنجا بازیافت خواهد شد. مدل، شامل ۳۱ آلترناتیو برای کارخانه‌های است و چهار نوع کارخانه بازیافت در مدل لحاظ می‌شود. در

است. در مدل توسعه داده شده باید به صورت هم زمان سود و اثرهای مثبت اجتماعی حداکثر و اثرات منفی زیست محیطی حداقل شوند. لذا در ابتدا مدل به صورت تک هدفه بهینه سازی شده و نتایج اجرای آن در جدول (۶) آمده است.

جدول (۶) مدل بهینه شده با توجه به تابع هدف انتخابی

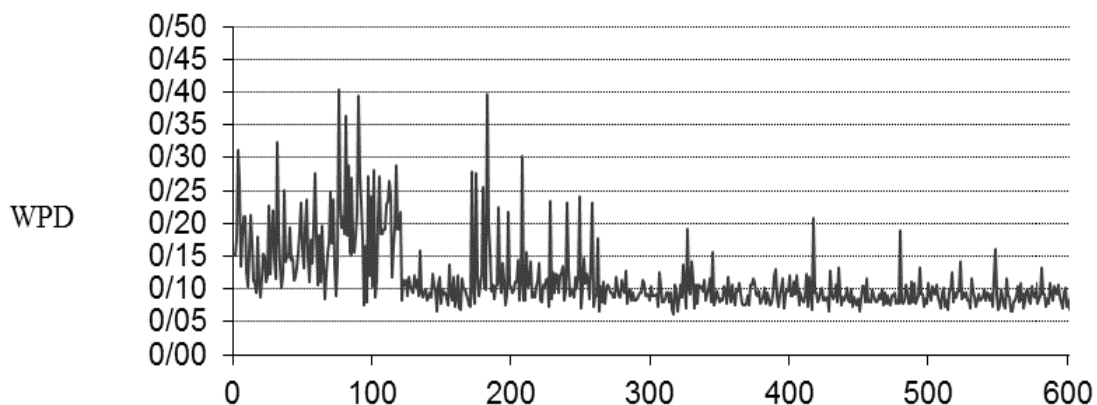
| تابع هدف انتخابی | مقادیر توابع هدف | | |
|------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| | سود (ریال × ۱۰۰۰۰) | زیست محیطی (Pt) | اجتماعی (× ۱۰۰۰) |
| سود | ۱۱۵۲۹۷۴۱۳ | ۶۵۱۲۶۴۱ | ۳۴۱ |
| زیست محیطی | ۵۳۱۲۸۸۷۱ | ۵۱۵۳۶۹۳ | ۲۷۳ |
| اجتماعی | ۲۵۱۶۱۳۲۱۲ | ۵۵۳۵۳۷۱ | ۵۴۲ |

تابع هدف، مقدار تابع هدف Z (سود زیست محیطی و اجتماعی) به دست آمده از اجرای مدل i و f_j^* مقدار تابع هدف بهینه شده براساس هر یک از سه تابع هدف در نظر گرفته شده در جدول (۶) است. به منظور حل مدل، وزن های هر یک از توابع هدف برابر هم در نظر گرفته شده و نتایج اجرای مدل در شکل (۶) نمایش داده شده است.

سپس براساس نتایج ارائه شده در جدول (۶)، مقدار انحراف وزنی تابع هدف (WPD)، طبق رابطه (۱۱) محاسبه شده است:

$$WPD_i = \sum_{j=1}^3 W_j \times \frac{|f_j^i - f_j^*|}{f_j^*} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) W_j وزن در نظر گرفته شده برای هر



شکل (۵) نتایج اجرای مدل براساس وزن های در نظر گرفته شده

ادامه یافته و سپس الگوریتم برای خروج از بهینه محلی نوسانات WPD مجدداً افزایش یافته است. جزئیات مربوط به نتایج به دست آمده در جدول (۷)

همان طور که در شکل (۵) نمایش داده شده است، هنگامی که تعداد تکرارها افزایش می یابد، مقدار WPD کاهش پیدا می کند. این کاهش تا تکرار ۵۰۰

حمل و نقل در حدود ۶۱٪ کل هزینه‌ها را تشکیل می‌دهد و هزینه راه‌اندازی کارخانه‌های بازیافت در حدود ۲۸٪ است.

نمایش داده شده است. براساس نتایج به دست آمده، شکل (۷) محل مراکز بازیافت را نمایش می‌دهد. براین اساس هزینه

جدول (۷) ظرفیت بهینه کارخانه‌های بازیافت در هریک از شهرها

| شهر | نوع کارخانه | | | | شهر | نوع کارخانه | | | |
|--------|-------------|-------|-------|-------|--------|-------------|-------|-------|------|
| | F | G | H | C | | F | G | H | C |
| تهران | ۲۰۰۰ | ۲۰۰۰۰ | ۲۰۰۰۰ | ۲۰۰۰۰ | تبریز | ۲۰۰۰ | ۱۲۰۰۰ | ۱۲۰۰۰ | ۸۰۰۰ |
| اصفهان | - | ۸۰۰۰ | ۸۰۰۰ | - | همدان | - | ۸۰۰۰ | ۱۲۰۰۰ | ۸۰۰۰ |
| شیراز | - | ۱۲۰۰۰ | ۸۰۰۰ | ۸۰۰۰ | ساری | - | ۸۰۰۰ | ۸۰۰۰ | - |
| مشهد | ۲۰۰۰ | ۲۰۰۰۰ | - | ۸۰۰۰ | یزد | ۲۰۰۰ | ۲۰۰۰۰ | ۱۲۰۰۰ | - |
| زنجان | - | ۲۰۰۰ | - | - | شهرکرد | - | ۲۰۰۰ | - | ۲۰۰۰ |
| کرمان | - | ۲۰۰۰ | - | ۲۰۰۰ | گلستان | | ۲۰۰۰ | | |

۵- نتیجه‌گیری

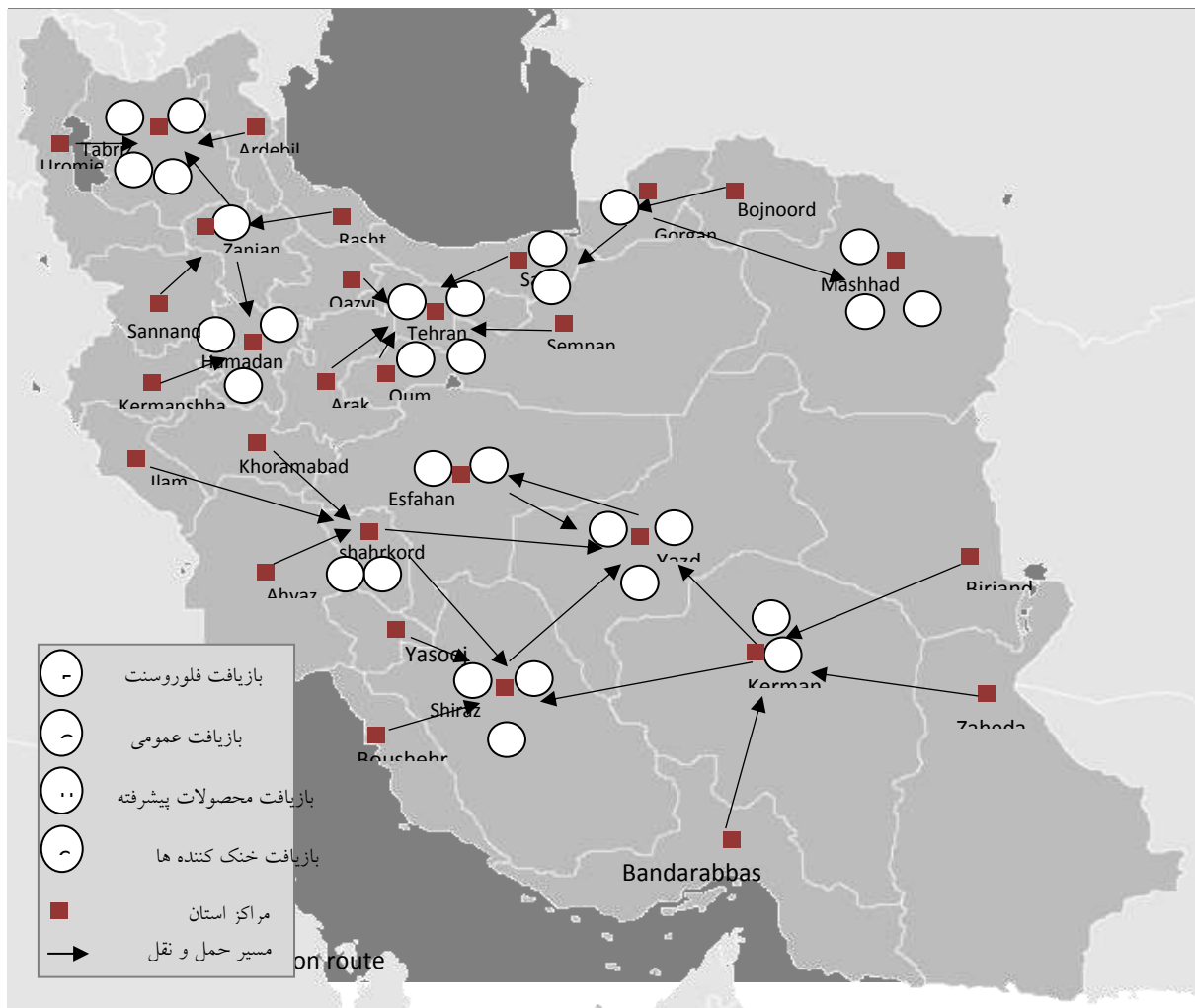
مدیریت زباله‌های الکترونیکی در حال تبدیل شدن به موضوع مهمی است و چالش بزرگی برای دولت‌های کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته است. بنابراین مدل توسعه‌یافته به عنوان ابزار مهمی برای مدیریت کارآمد زباله‌های الکترونیکی تولیدشده در نظر گرفته می‌شود. مدل توسعه‌یافته، سودهای خالص کلی و مزایای اجتماعی فراوری جریان زباله‌های الکترونیکی را حداکثر می‌کند. به علاوه اثرهای زیست‌محیطی شبکه لجستیک معکوس برای زباله‌های الکترونیکی را حداقل می‌کند. اثرات زیست‌محیطی هر یک از تنظیمات شبکه، با به‌کارگیری یک شاخص سازگار با محیط‌زیست کمی شدند. همچنین اثرات اجتماعی هر تصمیم به وسیله روش AHP کمی شد. روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی برای بهینه‌کردن مدل توسعه‌یافته به کار گرفته شد و

نتایج تحلیل شدند.

با توجه به تحقیق حاضر تحقیقات آتی زیر پیشنهاد می‌شود:

- در این تحقیق در بعد توسعه اجتماعی سه شاخص اشتغال، آسیب به کارگران و توسعه محلی مدل شد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی سایر شاخص‌های اجتماعی بررسی و مدل‌سازی شوند.

- همچنین در این تحقیق از ابزار بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده شد؛ پیشنهاد می‌شود از سایر ابزارها و روش‌های مدل‌سازی چندهدفه مانند الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شود.



شکل ۷. محل جغرافیایی هر یک از کارخانه‌های بازیافت به تفکیک نوع کارخانه

W., 2011. "Reverse production system infrastructure design for electronic products in the state of Texas". *Computers and Industrial Engineering*, 62 (1), 129–140.

4- Bloemhof-Ruwaard, J.M., Krikk, H., & Van Wassenhove, L.N. (2004). OR models for eco closed-loop supply chain optimization. *Reverse logistics: quantitative models for closed-loop supply chains*. 1st ed. Berlin: Springer.

5- Carter, C.R., & Jennings, M.M. (2002). "Logistics social responsibility: an integrative framework". *Journal of Business Logistics*, 23 (1), 145–180.

6- Chang, X., Huo, J., & Chen, S., (2006). "Study on integrated logistics network

منابع

1- Achilles, C., Vlachokostas, Ch., Aidonis, D., Moussiopoulou, N., Lakovou, E., & Banias, G. (2010a). "Optimizing reverse logistics network to support policy-making in the case of electrical and electronic equipment". *Waste Management*, 30(12), 2592–2600.

2- Achilles, C., Vlachokostas, Ch., Moussiopoulou, N., & Banias, G. (2010b). "Decision support system for the optimal location of electrical and electronic waste treatment plants: a case study in Greece". *Waste Management*, 30 (5), 870–879.

3- Assavapokee, T., & Wongthatsanekorn,

- Recycling* 45, pp 368-400.
- 16- Mansour, S. & Zarei, M. (2008). "A multi-period reverse logistics optimization model for end-of life vehicles recovery based on EU directive". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21 (7), 765–777.
 - 17- Morrissey, A.J. & Browne, J. (2004). Waste management models and their application to sustainable waste management". *Waste Management*, 24 (3), 297–308.
 - 18- Ongondo, F.O., Williams, I.D., & Cherrett, T.J. (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes". *Waste Management*, 31 (4), 714–730.
 - 19- Queiruga, D., Walter, G., Gonzales-Benito, J., & Spengler, T. (2008). "Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain". *Waste Management*, 28 (1), 181–190.
 - 20- Ramos, T.R.P., Prierá, T.R., Gomes, M.I., & Barbosa-Povoa, A.. (2014). "Economic and environmental concerns in planning recyclable waste collection systems". *Transportation Research Part E* 62. 34–54.
 - 21- Rousis, K., Mostakas, K., Malamis, S., Papadopoulos, A., & Loizidou, M. (2008). "Multicriteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus". *Waste Management*, 28, 1941–1954.
 - 22- Sahoo, S., Kim, S. Kim, B-I., Kraas, B., & Popov- Jr, A. (2005). "Routing optimization for waste management", *Interfaces*, 35(1), 24-36.
 - 23- Shokohyar, S., & Mansour, S. (2012). "Simulation-based optimisation of a sustainable recovery network for Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE)", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.
 - 24- Taghipour, H., Nowrouz, P., Yafar Abadi, M.A., Nazari, J., Hashemi, A.A., Mosaféri, M., & Dehghouzadeh. R. (2011). "Conditions e-waste management challenges in Iran: presenting some strategies for improvement of current". *Waste Management & Research*, to model and network design for waste electrical and electronic equipment. In: IEEE international conference on service operations and logistics and informatics, Shanghai". *New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 654–658.
 - 7- EPO, 2011 [online]. Available from: <http://www.irandoe.org> [Accessed 10 January 2011].
 - 8- Fleischmann, M., Van Nunen, J.A.E.E., & Grave B. (2003). "Integrating closed-loop supply chains and spare-parts management at IBM". *Interfaces*, 33 (6), 44–56.
 - 9- Gamberini, R., Gebennini, E., Manzini, R., & Ziveri, A. (2010). "On the integration of planning and environmental impact assessment for a WEEE transportation network– a case study Resources". *Conservation and Recycling*, 54, 937–951.
 - 10- Gomes, M.I., Barbosa-Povoa, A.P., & Novais, A.Q. (2011). "Modelling a recovery network for WEEE: a case study in Portugal". *Waste Management*, 31, 1645–1660.
 - 11- Grunow, M. & Gobbi, C. (2009). "Designing the reverse network for WEEE in Denmark". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58 (1), 391–394.
 - 12- Hicksa, C., Dietmar R., & Eugster M. (2005). "The recycling and disposal of electrical and electronic waste in China-legislative and market responses". *Environmental Impact Assessment Review*, 25, 459– 471.
 - 13- Huisman, J. & Magalini, F. (2007). Waste electrical and electronic equipment (WEEE) [online]. Available from: http://ewasteguide.info/files/WEEE_final_report_unu_part1.pdf [Accessed 10 January 2011].
 - 14- Kalana J., (2010). "Electrical and Electronic Waste Management Practice by households in Shah Alam, Selangor, Malaysia". *International Journal of Environmental Sciences*, 1(2).
 - 15- Kang, H-Y, Schoenung M. (2005). "Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options Resources". *Conservation and*

- Electrical and Electronics Engineers*, 403–408.
- 27- Ylä-Mella, J., Keisi, R.L., & Pongracz, E.. (2014). Implementation of Waste Electrical and Electronic Equipment Directive in Finland: Evaluation of the collection network and challenges of the effective WEEE management". *Resources, Conservation and Recycling*. 86, 38-46.
- appear.*
- 25- Tanskanen, P. (2013). Management and recycling of electronic waste. *Acta Materialia* 61. Published by Elsevier Ltd, 1001-1011.
- 26- Xianfeng, L., Jianwei, Q., & Meillan, L. (2010). "Design and simulation WEEE reverse logistics network in Guangxi. In: International conference on optoelectronics and image processing, Haiko". *New Jersey: Institute of*

پی نوشت

- 1 Sahoo
2 Waste from Electrical and Electronic Equipment
3 Tanskanen
4 Reverse logistics
5 Bloemhof-Ruwaard
6 Environmental Protection Organisation
7 End of Life
8 Extended of Producer Responsibility
9 Hicksa
10 Kang & Schoenung
11 Chang
12 Mixed integer Linear Programming
13 Queiruga
14 Multicriteria Decision Making
15 Rousis
16 Grunow and Gobbi
17 Gamberini
18 Life Cycle Assessment
19 Achilles
20 Xianfeng
21 Linear Programming
22 Kalana
23 Assavapokee and Wongthatsanekorn 2011.
24 Gomes
25 Ylä-Mella
26 Ramos
27 Huisman
28 Fleischmann
29 Morrissey and Browne
30 Carter