چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شماره ۱۱ ـ پاییز ۱۳۹۲
ص‌ص ۱۶۱ – ۱۳۹

یک روش تصمیم‌گیری چندهدفه برای مدیریت پایان عمر تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی

عباس راد*، سعید منصور، Yuchun Xu***، سید محمد تقی فاطمی قمی*****

چکیده

وجود مواد سمی و خطرناک در محصولات الکتریکی و الکترونیکی که یک تهدید برای محیط‌زیست و آینده بشر به شمار می‌آید، باعث شده است استفاده‌کنندگان از این محصولات و دولت‌ها فشاری را بر سازندگان وارد آورند تا مسئولیت پایان عمر محصولاتشان را برای بازپس‌گیری و بازیابی آن‌ها برعهده گیرند. بازیابی این محصولات منافع اقتصادی برای بازیافت‌کنندگان و منافع اجتماعی برای جامعه و اجتماع دارد؛ بنابراین ایجاد یک سیستم مدیریتی برای تصمیم‌گیری درمورد بازیابی محصولات الکتریکی که از یک طرف منافع اقتصادی و اجتماعی را حداکثر و اثرات و خطرات محیط‌زیستی را حداقل کند، ضروری است. در این مقاله یک مدل ریاضی چندهدفه مبتنی بر ابعاد توسعه پایدار برای انتخاب گزینه (های) مناسب بازیابی برای محصولات الکتریکی و الکترونیکی توسعه داده شده است. برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده شده است. یک مطالعه موردی که داده‌های آن از صنعت گرفته شده است، برای اعتبارسنجی مدل به‌کار گرفته شده است.

کلیدواژه‌ها: توسعه پایدار؛ مدل ریاضی چند هدفه؛ محصول به پایان عمر رسیده؛ ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۴/۱تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۹/۲

* دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و محقق دانشگاه کرانفیلد انگلستان.

** دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (نویسنده مسئول).

E-mail: s.mansour@aut.ac.ir

***دانشیار، دانشگاه کرانفیلد انگلستان.

****استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۱. مقدمه

محصولات الکتریکی متنوعی چون رایانه، چاپگر، تلویزیون، یخچال، تلفن همراه، پخش‌کننده موزیک، تجهیزات دارویی و ... در پایان عمرشان به‌عنوان ضایعات تجهیزات الکتریکی درنظر گفته می‌شوند. اهمیت روبه‌فزونی بازیابی و مقوله‌های مرتبط با توسعه پایدار، باعث ایجاد بحث‌های جدیدی درمورد آینده ضایعات الکترونیک شده است. پیش‌بینی شده است که ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی رشد سالانه‌ای بین ۲/۵ تا ۲/۷ درصد خواهد داشت [۱۷] برنامه محیط‌زیست سازمان ملل تخمین می‌زند که هرساله، جهان بالغ بر ۵۰ میلیون تن ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی تولید می‌کند. این رشد به‌دلیل عواملی چون افزایش جمعیت و در پی آن، افزایش مصرف محصولات الکتریکی و کاهش زمان چرخه عمر این محصولات و تغییرات سریع فناوری است. هرچند بازیابی تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی منافع اقتصادی و اجتماعی دارد، عناصر خطرناکی همچون جیوه، آرسنیک، کادمیم و ... نیز دارند که یک تهدید جدی برای محیط‌زیست و سلامت انسان است؛ به‌همین‌دلیل انتخاب راهبردهای مناسب برای بازیابی در پایان عمر که هم‌زمان منافع اقتصادی و اجتماعی را حداکثر و مضرات محیط‌زیستی را حداقل کند، یک مقوله مهم و حیاتی به شمار می‌آید. برای ایجاد یک روش یکپارچه که هدفش مدیریت محصولات در پایان عمر، به‌طوری‌که دوستدار محیط‌زیست باشد، دستورالعمل‌های مختلفی برای سازندگان تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی تدوین شده است [۱۷]؛ ازجمله می‌توانیم به قوانینی چون دستورالعمل ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی[1] (WEEE) و مسئولیت وسیع تولیدکننده[2] (EPR) و محدودیت روی مواد خطرناک[3] (RoHS) اشاره کنیم که تولیدکنندگان را مجبور می‌کند مسئولیت محصولاتشان را در مرحله پایان عمر قبول کنند. اتحادیه اروپا برای ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی دستورالعمل‌هایی مانند 2002/96/EC [۱۳] و 2002/95/EC [۱۴] را وضع کرده است. دستورالعمل RoHS استفاده از مواد خطرناکی چون کادمیم، کرم، ارسنیک و جیوه را در تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی محدود کرده است [۳۰] و دستوارالعمل EPR سازندگان را تشویق می‌کند محصولاتشان را در پایان عمر با هزینه خودشان مدیریت کنند و اهداف بازیابی محصولی را که به پایان عمر خود رسیده است، برآورده کنند. هدف نهایی EPR توسعه پایدار ازطریق مسئولیت بازیابی محصول و توسعه محصول به روشی سازگار با محیط‌زیست است [۲۹]. شرکت‌های بزرگ در سراسر جهان درحال پاسخگویی به این قوانین هستند؛ درنتیجه مدیریت ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی یک زمینه کاری موردعلاقه دانشمندان و سیاستمداران شده است.

1. Waste from Electrical and Electronic Equipment
2. Extended Producer Responsibility
3. Restriction of the use of certain Hazardous Substances

تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان و دولت‌ها برای مدیریت محصول درمرحله پایان عمر، علاقه بسیار نشان داده‌اند [۶]. در ده سال آینده، فروش رایانه در ایران به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد[۲۴]. اگر چاره‌ای برای بازیافت انبوه مواد خطرناک موجود در آن‌ها اندیشیده نشود، عواقب بسیار خطرناکی برای محیط‌زیست به بار می‌آید. ایران هم به‌ناچار، در راه ایجاد قوانینی درمورد ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی است؛ به‌طوری‌که هر تولیدکننده تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی در ایران باید سازمان خود را با این قوانین مطابق کند و مسئولیت ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی خود را بپذیرد. درادامه، راهکارهای بازیابی ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی در پایان عمرشان را که برگرفته از ادبیات موضوع است، ارائه می‌کنیم:

استفاده مجدد[1] (RU): استفاده اقلام توسط مشتری دوم بدون عملیات تعمیر قبلی یا مطابق طراحی اولیه استفاده؛

پرداخت مجدد[2] (RF): فرایند بازگردانی قطعات به یک وضعیت قابل‌رضایت یا کارکردی مطابق مشخصات اصلی، بااستفاده از روش‌هایی مانند کار مجدد، رنگ‌آمیزی مجدد و ...؛

ساخت مجدد[3] (RM): فرآیند بازآوری اقلام مونتاژی به شرایط کارکردی اولیه، ازطریق جای‌گذاری یا ساخت مجدد قطعات؛

بازیافت[4] (RC): فرآیند گرفتن مواد قطعات و کار روی آن‌ها برای ساختن مواد مشابه یا مفید؛

دورریز[5] (DP): فرآیند سوزاندن و دفن‌کردن؛

سوزاندن[6] (IN): سوزاندن مواد زاید برای تولید انرژی، درصورتی‌که بازیافت مواد و قطعات امکان‌پذیر نباشد؛ البته باتوجه به جنس مواد ممکن است این عملیات بدون بازیافت انرژی گرمایی باشد؛

دفن‌کردن[7] (LF): دورریختن ضایعات و دفن‌کردن آن‌ها در مکان‌های مشخص؛ درصورتی‌که بازیافت مواد و قطعات امکان‌پذیر نباشد [۲۱].

در انتخاب گزینه پایان عمر برای بازیابی یک محصول، به‌دست آوردن ارزش اقتصادی و درنظر گرفتن اثرات اجتماعی و محیط زیستی به‌عنوان عوامل کلیدی موردنظر است. انتخاب هر گزینه پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی مختص به خود را دارد. به‌منظور پیشنهاد یک ابزار پشتیبان تصمیم‌سازی برای کمک به سازندگان در تصمیم‌گیری‌هایشان هنگام انتخاب بهترین گزینه بازیابی محصولاتشان در پایان عمر، یک مدل ریاضی چندهدفه توسعه داده شده است.

1. Reuse
2. Referbishing
3. Remanufacturing
4. Recycling
5. Disposal
6. Inceneration
7. Ladfiling

برای محاسبه اثرات اجتماعی در مدل پیشنهادی، روش AHP مرحله‌ای به‌کار گرفته شده است. این مدل همچنین در بازیافت همه نوع ضایعات الکترومکانیکی می‌تواند به‌کار گرفته شود. برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌سازی تصمیمات مربوط به مرحله پایان عمر کمک گرفته شده است. طبق مدل توسعه داده شده، تنها قطعاتی که ارزش اقتصادی ندارند یا برای محیط‌زیست بی‌خطر هستند، ابتدا سوزانده می‌شوند و درغیراین‌صورت دفن می‌شوند؛ درحالی‌که بیشتر قطعات استفاده مجدد، پرداخت مجدد، ساخت مجدد و بازیافت خواهند شد. بقیه مقاله به‌صورت زیر سازماندهی شده است. در بخش دو به مرور ادبیات موضوع می‌پردازیم، بخش سه به توسعه یک مدل ریاضی برای انتخاب بهترین گزینه برای بازیابی قطعات مربوط است، در بخش چهار کاربرد مدل توسعه‌یافته با به‌کارگیری یک مطالعه موردی (رایانه) را نشان می‌دهیم، در بخش پنج نتایج و بحث‌های بیشتر را مطرح می‌کنیم و در بخش شش به نتیجه‌گیری می‌پردازیم.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

دسته‌بندی‌های تحقیقاتی زیادی روی مبحث WEEE انجام شده است؛ ازجمله می‌توانیم از کاربرد مفهوم WEEE و مدیریت آن در لجستیک معکوس (به‌خصوص بازیافت و رویه‌های تکنیکی آن)، مقررات مربوط به WEEE، کاربردهای مدیریت ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی، بهینه‌سازی مسائل کلیدی در مدیریت ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی نام ببریم. نویسندگان محدودی معیار اجتماعی را در ارزیابی استراتژی‌های پایان عمر برای ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی درنظر گرفته‌اند.

ابوبکر و رحیمی‌فرد [۱] در بازیابی یخچال از ابزاری به‌نام ECO^2 استفاده کردند. آن‌ها تنها از دو گزینه موجود برای بازیابی استفاده کردند. ابزار ECO^2 که یک شاخص ارزیابی است، فقط معیارهای اقتصادی و محیط‌زیستی را لحاظ می‌کند. بوفاردی و همکاران [۶] یک روش تصمیم‌گیری چندهدفه برای ارزیابی چند گزینه پایان عمر برای جاروبرقی ارائه کردند. آن‌ها روش ELECTREII [۳۱] را برای ارزیابی خود براساس معیارهای اقتصادی و محیط‌زیستی به‌کار بردند. خروجی مدل مجموعه‌ای از گزینه‌های اولویت‌بندی شده بود که این گزینه‌ها قبلاً توسط مؤلفان تعریف شده بود. آن‌ها پنج گزینه بازیابی درنظر گرفتند که هر گزینه شامل ترکیبات مختلف راهکارهای بازیابی تعریف‌شده در بخش قبل، برای قطعات مختلف بود. قرقه و همکاران [۱۵] در مرحله طراحی محصول از روش تصمیم‌سازی مرحله‌ای چندمعیاره برای بررسی محصول در پایان عمر استفاده کردند. شکوهیار و همکاران [۳۲] یک مدل برای یکپارچه‌سازی مدیریت پایان عمر محصولات و خدمات ارائه کردند. اثرات اجتماعی هم در این تحقیق مانند بقیه موارد

موردبررسی قرار نگرفته است. دوئیب و الومی [۱۱] یک روش جدید چندمعیاره برای مدیریت پایان عمر محصول ارائه کردند. در این مقاله معیارهای کمی و کیفی درنظر گرفته شد. آن‌ها چندین گزینه برای بازیابی یک رایانه مستهلک شده را اولویت‌بندی کردند. این گزینه‌های بازیابی مانند گزینه‌های بازیابی در مقاله بوفاردی و دیگران از پیش تعریف شده بود؛ هرچند چن [۸]انتخاب راهکارهای بازیابی را به‌عنوان یک مسئله تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره درنظر گرفت و برای حل مسئله روش تحلیل رابطه خاکستری[1](GRA)را در سطح مواد به‌کار برد. ختریول و همکاران [۲۵] مفهوم EPR و کاربرد آن را در بررسی پایان عمر ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی معرفی کردند و به موازات آن، برکتلی و همکاران [۵] یک تکنیک برنامه‌ریزی خطی برای ارزیابی استراتژی‌های پایان عمر ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی در یک محیط فازی توسعه دادند. مسئله به‌عنوان یک مسئله تصمیم‌سازی گروهی چندشاخصه با ترجیحات گزینه‌های مختلف بازیابی پایان عمر درنظر گرفته شد. گزینه‌های محدودی برای بازیابی در این مقاله درنظر گرفته شده است. کو [۲۶] مسئله تجزیه قطعات و بازیابی ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی را درنظر گرفت. او روش تحلیل شبکه‌های پتری[2](PNA) را برای حل مسئله تجزیه قطعات WEEE به‌کار گرفت. برای تجزیه قطعات، روش پیشنهادشده مبتنی‌بر PNA، اثرات محیط‌زیستی و هزینه را به‌عنوان معیارهای اصلی برای انتخاب بهترین سناریو درنظر گرفت. ایکوو و همکاران [۲۱] یک روش ماتریسی چندمعیاره را برای کمک به تولیدکنندگان برای انتخاب گزینه‌های پایان عمر توسعه دادند. در این متدولوژی شاخص‌هایی مثل ارزش نهایی قطعه مستهلک‌شده، بار محیط‌زیستی، وزن و سادگی تجزیه قطعات برای هر قطعه به‌عنوان معیار درنظر گرفته شدند. بهداد و همکاران [۴] در روشی دیگر، مسائل تجزیه قطعات و مرحله پایان عمر را هم‌زمان درنظر گرفتند. دو متغیر تصمیم برای تعیین میزان تجزیه قطعات یک محصول و تعیین راهکار بازیابی مناسب برای هر توالی خاص از تجزیه قطعات، به‌عنوان دو خروجی مدل درنظر گرفته شدند؛ هرچند گزینه های پایان عمر محدودی، آن هم تنها از دیدگاه اقتصادی، در این کار تحقیقاتی درنظر گرفته شد. در جدول ۱ خلاصه ادبیات موضوع و مقایسه مقالات را ارائه کرده‌ایم.

1. Gray Rational Analysis
2. Petri Net Analysis

جدول ۱. مرور ادبیات و مقایسه مقالات مرتبط

کار تحقیقاتی	متدولوژی	گزینه پایان عمر برای هر قطعه	معیارها			محصول الکتریکی	گزینه پایان عمر درنظر گرفته شده			
			اقتصادی	محیط‌زیستی	اجتماعی		DP	RC	RM	RU/ RF
[۲۳]	Linker Software	×	✓	✓	×	×	×	✓	✓	✓
[۳۰]	EoL design	×	✓	✓	×	×	×	✓	✓	✓
[۶]	ELECTR EIII	×	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	✓
[۸]	Gray rational analysis	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	×
[۱۱]	PROMPT HEEII	×	✓	✓	×	✓	×	✓	✓	✓
[۲۷]	Mathemat ical model	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	✓
[۱]	Eco2 methodolo gy	✓	✓	✓	×	✓	×	✓	×	×
[۳۲]	Mathemat ical model	✓	✓	✓	×	✓	×	✓	✓	✓
[۲۶]	Perti net analysis	×	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	✓
مقاله اخیر	Mathemat ical model	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

۳. روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش یک مدل ریاضی چندهدفه[1](MOMM) را توسعه می‌دهد که سه معیار اقتصادی، اجتماعی و محیطزیستی را با هم درنظر گرفته و تمام گزینه‌های ممکن را برای بازیابی یک محصول الکتریکی و الکترونیکی موردتوجه قرار می‌دهد و درپایان، به‌طور مشخص بهترین گزینه را برای بازیابی هر قطعه ارائه می‌کند.

ارزیابی یک محصول با ۱۲ قطعه و ۶ گزینه پایان عمر، نیاز به درنظر گرفتن 6^{12} جواب ممکن دارد. هریک از این جواب‌ها سه مؤلفه اقتصادی، اجتماعی و محیطزیستی دارند که بیانگر ارزش نهایی بازیابی گزینه‌های متفاوت برای قطعات مختلف هستند. مقایسه همه این جواب‌ها در یک زمان منطقی، درحالت‌کلی دشوار است. روش MOGAII برای انتخاب گزینه‌های بازیابی در پایان عمر یک محصول برای حل مدل ریاضی سه‌هدفه به‌کار گرفته شده است.

تعریف مسئله. طبق EPR و قوانین دیگر، سازندگان برای برگشت محصولاتشان در مرحله پایان عمر، مسئولیت دارند [۲۶]. در این مقاله برای بازیابی محصولات در پایان عمر، انتخاب گزینه مناسب پایان عمر برای هر قطعه از محصول باتوجه به معیارهای اقتصادی، اجتماعی و محیطزیستی موردتوجه است. شش گزینه بازیابی در دسترس هستند؛ استفاده مجدد (RU)،

1. Multi Objective Mathematical Model

پرداخت مجدد (RF)، ساخت مجدد (RM)، بازیافت مواد (RC)، دفن (LF) و سوزاندن (IN) [۱۸]. هر گزینه برای بازیابی، پیامدهای مشخصی ازلحاظ اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی دارند. چهار شاخص برای اثرات اجتماعی شامل اشتغال، آسیب به کارگران، توسعه محلی و ریسک محصول [۷، ۱۲، ۲] موردتوجه قرار گرفته است.

اهداف مدل به صورت زیر هستند:

۱. بیشینه‌کردن اثرات منافع اقتصادی حاصل از بازیابی محصول در مرحله پایان عمر؛

۲. مینیمم‌کردن اثرات مخرب محیط‌زیستی حاصل از بازیابی محصول در مرحله پایان عمر؛

۳. بیشینه‌کردن منافع اجتماعی حاصل از بازیابی محصول در مرحله پایان عمر.

مدل ریاضی. در این بخش، مدل ریاضی مسئله را ارائه می‌کنیم. پارامترها و متغییرهای تصمیم به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

پارامترها

n: تعداد قطعات

m: تعداد گزینه‌های بازیابی

i: اندیس مجموعه قطعات محصول $i=1,2,...,n$

j: اندیس مجموعه گزینه‌های بازیابی در پایان عمر $j=1,2,...,m$

$j=1$ برای استفاده مجدد، $j=2$ برای پرداخت مجدد، $j=3$ برای ساخت مجدد، $j=4$ برای بازیافت، $j=5$ برای سوزاندن و $j=6$ برای دفن.

G_{ji}: منافع اقتصادی حاصل از بازیابی قطعه i توسط روش j

E_{ji}: اثر مخرب محیط‌زیستی ناشی از انتخاب گزینه j در بازیابی قطعه i

S_{ji}: منافع اجتماعی ناشی از انتخاب گزینه j در بازیابی قطعه i

CA: هزینه سوارکردن قطعات

CD: هزینه تجزیه قطعات

CRM_i: هزینه ساخت مجدد قطعه i

CR_i: هزینه بازیافت مواد از قطعه i

CT: هزینه جمع‌آوری محصول

CLF_i: هزینه دفن قطعه i

CIN_i: هزینه سوزاندن قطعه i

CP_i: هزینه خرید مواد جدید برای قطعه i

C_{ji}: هزینه بازیابی قطعه i توسط روش j
ET: اثرات محیطزیستی ناشی از جمع‌آوری محصول
ED: اثرات محیطزیستی ناشی از تجزیه قطعات محصول
EA: اثرات محیطزیستی ناشی از سوارکردن محصول
ERM_i: اثرات محیطزیستی ساخت مجدد قطعه i
ER_i: اثرات محیطزیستی بازیافت قطعه i
ELF_i: اثرات محیطزیستی دفن قطعه i
EIN_i: اثرات محیطزیستی سوزاندن قطعه i
EP_i: اثرات محیطزیستی تعویض قطعه i
NW_{em}: وزن نرمال‌شده معیار اشتغال
EM_{ji}: امتیاز معیار اشتغال در بازیابی قطعه i بااستفاده از روش j
NW_{dw}: وزن نرمال‌شده معیار شرایط کاری
DW_{ji}: امتیاز معیار شرایط کاری در بازیابی قطعه i بااستفاده از روش j
NW_{ld}: وزن نرمال‌شده معیار توسعه محلی
LD_{ji}: امتیاز معیار توسعه محلی در بازیابی قطعه i بااستفاده از روش j
NW_{pr}: وزن نرمال‌شده معیار ریسک محصول
PR_{ji}: امتیاز معیار ریسک محصول در بازیابی قطعه i بااستفاده از روش j

متغیرها. X_{ji} اگر برای بازیابی قطعه i از گزینه j استفاده شود، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.
در مورد مطالعه ۱۲ قطعه وجود دارد که برای همه آن‌ها شش گزینه بازیابی در دسترس است. i=1,...,12 و j=1,...,6

سه تابع هدف. تابع هدف اقتصادی باتوجه به پارامترهای بالا عبارت است از:

رابطه ۱ $\text{Max } Z_1=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}(G_{ji}-C_{ji})\,x_{ji}$

که

رابطه ۲ $C_{1i}=CT$

رابطه ۳ $C_{2i}=CT+CD+CP_i+CA$

رابطه ۴ $C_{3i}=CT+CD+CRM_i+CA$

$C_{4i}=CT+CR_i$ رابطه ۵

$C_{5i}=CT+CIN_i$ رابطه ۶

$C_{6i}=CT+CLF_i$ رابطه ۷

رابطه ۲ هزینه استفاده مجدد قطعه را نشان می‌دهد که تنها شامل هزینه جمع‌آوری است. رابطه ۳ هزینه پرداخت مجدد قطعه است که هزینه‌های جمع‌آوری، تجزیه قطعه، خرید مواد جدید و سوارکردن قطعه را در محصول نهایی دربرمی‌گیرد. رابطه ۴ هزینه ساخت مجدد است که شامل هزینه‌های جمع‌آوری، تجزیه قطعه، ساخت مجدد و سوارکردن قطعه است. رابطه ۵ هزینه بازیافت قطعه است که شامل هزینه‌های جمع‌آوری و هزینه‌های بازیافت مواد است. روابط ۶ و ۷ به‌ترتیب هزینه‌های سوزاندن و دفن‌کردن قطعات را نشان می‌دهند که شامل هزینه‌های جمع‌آوری و سوزاندن و دفن‌کردن هستند.

تابع هدف محیط‌زیستی عبارت است از:

$\text{Min } Z_2=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}E_{ji}\,x_{ji}$ رابطه ۸

که

$E_{1i}=\text{ET}$ رابطه ۹

$E_{2i}=\text{ET}+ED+EP_i+EA$ رابطه ۱۰

$E_{4i}=\text{ET}+ED+ERM_i+EA$ رابطه ۱۱

$E_{3i}=\text{ET}+ER_i$ رابطه ۱۲

$E_{6i}=\text{ET}+EIN_i$ رابطه ۱۳

$E_{5i}=\text{ET}+ELF_i$ رابطه ۱۴

روابط ۹ تا ۱۴ اثرات محیط‌زیستی راهکارهای بازیابی مختلف را برای قطعات محصول مشابه روابط ۲ تا ۷ بیان می‌کنند.

تابع هدف اجتماعی عبارت است از:

$\text{Max } Z_3=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{6}(NW_{em}\,EM_{ji}+\text{N}W_{dw}DW_{ji}+NW_{ld}LD_{ji}+NW_{pr}PR_{ji})x_{ji}$ رابطه ۱۵

محدودیت‌های مدل به‌صورت زیر هستند:

الف. برای هر قطعه تنها باید یک گزینه بازیابی انتخاب شود.

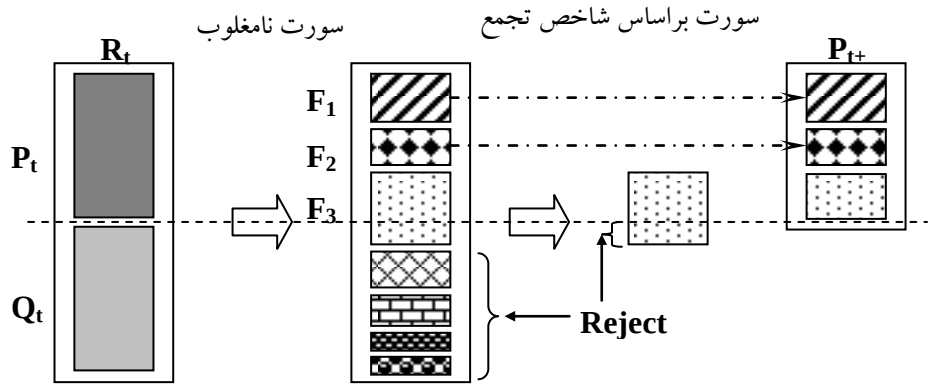
$\sum_{j=1}^{m}x_{ji}=1$ رابطه ۱۶

ب. متغییرهای تصمیم تنها مقادیر صفر و یک می‌گیرند.

$x_{ji}=0,1$ رابطه ۱۷

روش حل. الگوریتم NSGAII[1] [۱۰] برای یافتن جواب بهینه موضعی برای برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه بالا به‌کار گرفته شده است. این الگوریتم در ادبیات موضوع مشابه در حوزه مدیریت پایان عمر محصول استفاده شده است. در بخش‌های بعدی چگونگی پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه را به‌تفصیل بیان می‌کنیم.

فرآیند الگوریتم. در الگوریتم NSGA-II، ابتدا جمعیت فرزندان O_t توسط جمعیت والد P_t تولید می‌شوند، در مرحله بعد جمعیت والد و فرزندان در هم ادغام می‌شوند و جمعیت واحد R_t را با اندازه 2Nتشکیل می‌دهند و سپس بااستفاده از مرتب‌سازی نامغلوب[2] کروموزوم‌های جمعیت R_t در سطوح نامغلوب[3](یا پارتو) طبقه‌بندی می‌شوند؛ بدین‌صورت‌که سطح اول، شامل جواب‌هایی است که توسط هیچ‌یک از جواب‌های دیگر مغلوب نمی‌شوند. بدون درنظر گرفتن جواب‌های سطح اول، سطح نامغلوب دوم، شامل جواب‌هایی است که توسط هیچ‌یک از جواب‌های باقی‌مانده مغلوب نمی‌شوند و به همین صورت بقیه سطوح مشخص می‌شوند. جمعیت جدید با اندازه N بااستفاده از کروموزوم‌های متعلق به سطوح بالاتر تشکیل می‌شود؛ به‌این‌ترتیب N کروموزوم متعلق به سطوح پایین‌تر حذف می‌شوند. ممکن است در آخرین سطح پارتوی مجاز برای قراردادن کروموزوم‌های آن در جامعه نسل بعد، تعداد کروموزوم‌های سطح پارتو بیش از تعداد موردنیاز جامعه باشد؛ در این حالت به‌جای انتخاب دلخواه کروموزوم‌ها، از تورنمنت تجمع برای انتخاب اعضای آخرین سطح پارتوی مجاز استفاده می‌شود. شکل ۱ به‌صورت شماتیک نشان‌دهنده نحوه عمل NSGA-II است.



شکل ۱. فرآیند شماتیک NSGA-II (دب و همکاران، ۲۰۰۲)

1. Nondominated Sorting Genetic Algorithm II
2 Non-dominated sorting
3. Non-dominated frontier

اپراتور انتخاب براساس تورنمنت تجمع. اپراتور انتخاب براساس تورنمنت تجمع ($<c$) با مقایسه دو جواب، برنده تورنمنت را برمی‌گرداند. برای استفاده از این اپراتور فرض می‌شود که برای هر جواب i دو مشخصه موجود است:

۱. رتبه نامغلوبی معادل r_i در جامعه

۲. فاصله تجمع محلی معادل d_i در جامعه

فاصله تجمع d_i برای یک جواب به‌عنوان یک معیار نشان‌دهنده فضای جست‌وجو در اطراف جواب i است که توسط هیچ جواب دیگری در جامعه پوشانده نشده است. براساس دو مشخصه بالا، اپراتور انتخاب براساس تورنمنت تجمع به‌صورت زیر قابل‌تعریف است:

«جواب i برنده تورنمنت با جواب j است، اگر یکی از شرایط زیر برقرار باشد:

۱. اگر i رتبه نامغلوبی بهتری نسبت به j داشته باشد.

۲. اگر دو جواب i و j رتبه نامغلوبی یکسان داشته باشند، فاصله تجمع برای جواب i بیشتر از فاصله تجمع برای j باشد».

فاصله تجمع. برای تعیین تخمینی از چگالی جواب‌ها در اطراف جواب i در جامعه، از متوسط فاصله میان مقادیر هر یک از اهداف متناظر با دو جواب مجاور در دو طرف جواب i و مقدار اهداف متناظر با جواب i استفاده می‌شود.کمیت d_i تخمینی از محیط مستطیلی است که رئوس آن را نزدیک‌ترین جواب‌های همسایه با جواب i تشکیل داده‌اند. شکل ۲ فاصله تجمع را که با خطوط منقطع رسم شده است، برای یک مسئله دوهدفی به نمایش می‌گذارد. تعیین فاصله تجمع برای هر جواب متعلق به لبه نامغلوب ،F توسط الگوریتم زیر صورت می‌پذیرد:

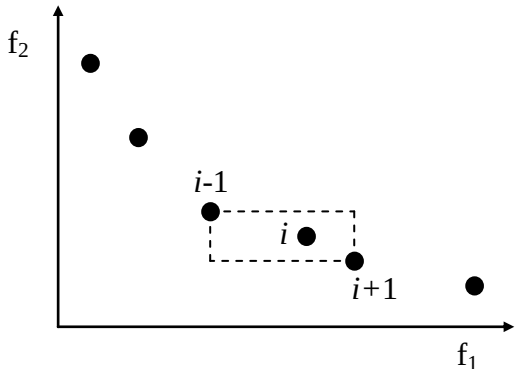
گام ۱. تعداد جواب‌های متعلق به F را معادل $l = |F|$ بگیرید. برای هر جواب i متعلق به F قراردهید. $d_i = 0$.

گام ۲. برای هر تابع هدف $m=1,\ldots, M$، جواب‌ها را براساس مقادیر f_m به ترتیب بدتر شدن، مرتب کنید.

گام ۳. به‌ازای هر m، یک فاصله بسیار بزرگ را به جواب‌های ابتدایی و انتهایی مرحله قبل تخصیص دهید و برای جواب‌های ۲ تا l-1 فاصله d_i را به‌صورت معادله ۱۸ محاسبه کنید.

$$d_{I_j^m} = d_{I_j^m} + \frac{f_m^{(I_{j+1}^m+1)} - f_m^{(I_{j-1}^m)}}{f_m^{max} - f_m^{min}}$$ رابطه ۱۸

I_j نمایانگر jامین عضو در لیست مرتب‌شده مرحله دوم است. مقادیر f_m^{max} و f_m^{min} می‌توانند برابر مقادیر بیشینه و کمینه تابع هدف mام در جامعه باشند.



شکل۲. فاصله تجمع برای جواب i

درادامه، مراحل اجرای الگوریتم را به‌صورت گام‌به‌گام شرح می‌دهیم. ابتدا یک جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی تولید می‌شود و کروموزوم‌های آن در سطوح نامغلوبطبقه‌بندی می‌شوند. به هریک از جواب‌ها مقدار برازندگی معادل شماره سطح نامغلوبی تخصیص می‌یابد که جواب متعلق به آن است. سپس از عملگر انتخاب براساس تورنمنت باینری[1](به‌همراه عملگر تورنمنت تجمع[2]) و عملگرهای تقاطع و جهش برای تولید جمعیت فرزندان با اندازه N استفاده می‌شود. در زیر گام های موردنیاز الگوریتم NSGA-II را آورده‌ایم:

گام ۱. جمعیت والد P_t و جمعیت فرزندان O_t را ترکیب کنید و جمعیت حاصل را R_t بنامید. مرتب‌سازی نامغلوب را روی جامعه R_t اعمال کنید و سطوح نامغلوب F_i را تعیین کنید.

گام ۲. جامعه نسل بعد، $P_{t+1} = \phi$ را درنظر بگیرید. شمارنده i را برابر یک فرض کنید. مادامی که $|P_{t+1}| + |F_i| < N$، قراردهید $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$ و $i = i + 1$.

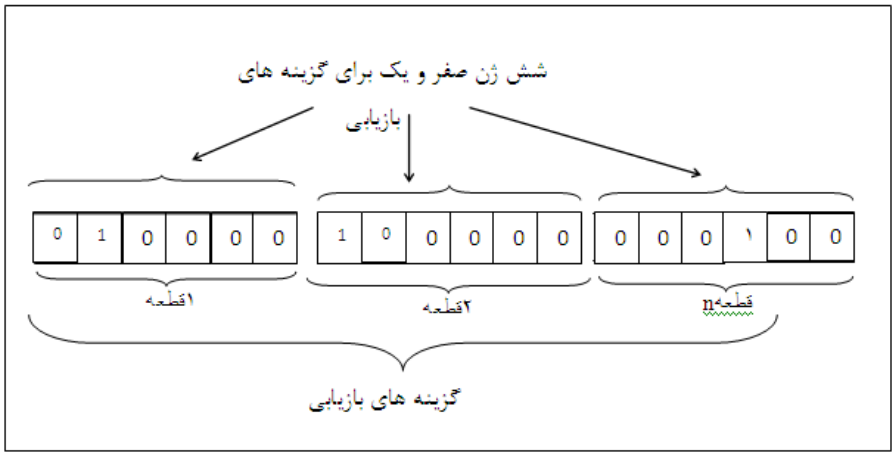
گام ۳. بااستفاده از روش رتبه‌بندی تجمع[3]، $N - |P_{t+1}|$ جواب با بیشترین فاصله تجمع را از آخرین لبه پارتوی مجاز انتخاب کنید.

گام ۴. جمعیت فرزندان O_{t+1} را بااستفاده از جامعه P_{t+1} و برمبنای اپراتورهای انتخاب براساس تورنمنت تجمع، تقاطع و جهش تولید کنید.

بخش‌های بعدی چگونگی پیاده‌سازی این الگوریتم را شرح می‌دهند.

1. Binary tournament selection
2. Crowded tournament operator
3. Crowding sort procedure

نمایش. در الگوریتم GA برای حل مسئله، هر کروموزم تعدادی ژن صفر و یک دارد. گزینه‌های بازیابی برای پایان عمر هر قطعه به‌صورت یک کروموزم j ژنی، مثلاً شش ژنی، درنظر گرفته می‌شود. عدد یک در هر ژن نشانگر انتخاب گزینه پایان عمر متناظر برای قطعه خاص و عدد صفر برای حالتی غیر از این است. در هر بخش تنها یک ژن دارای مقدار یک است؛ به این معنی تنها باید یک گزینه پایان عمر برای بازیابی هر قطعه از محصول انتخاب شود. یک کروموزم $j \times i$ ناظر به درنظر گرفتن شش گزینه پایان عمر برای ۱۲ قطعه است. یک نمونه کروموزم را در شکل ۳ نشان داده‌ایم.



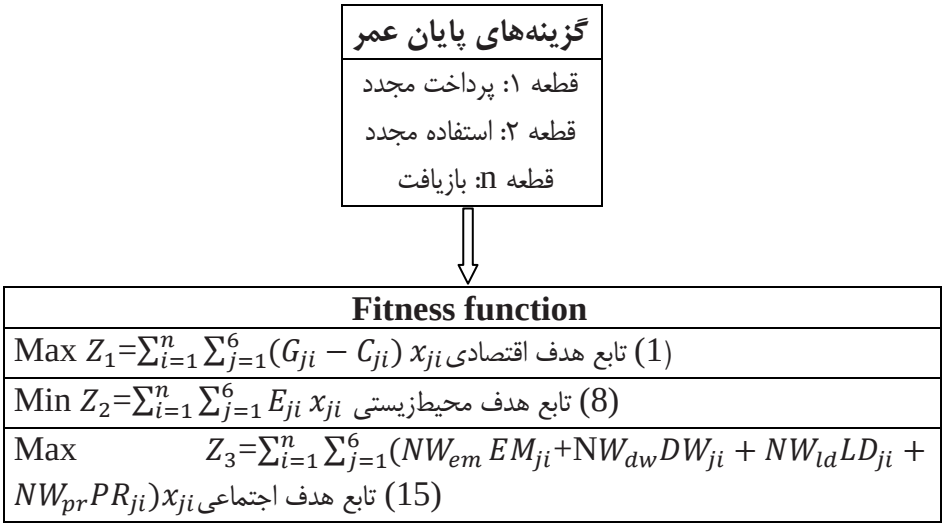
شکل۳. نمایش کروموزم برای الگوریتم ژنتیک

در این مثال، اولین شش‌ژن از کرموزوم متعلق به قطعه یک است که در آن مقدار یک نشان می‌دهد که قطعه یک باید به روش دوم، یعنی پرداخت مجدد، بازیابی شود. همچنین قطعه ۲ باید دوباره استفاده شود.

تابع برازش[1]. در بهینه‌سازی چندهدفه نکته کلیدی این است که چگونه ارزش برازش برای هر کروموزم درنظر گرفته شود. مقدار برازش هر کروموزم نشان می‌دهد که چه مقدار آن کروموزم در کسب اهداف موفق بوده است. هرقدر تابع برازش یک کروموزم بیشتر باشد، احتمال بقای آن طی مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک بیشتر است. تابع برازش نشان‌دهنده کیفیت جواب مربوطه با درنظر گرفتن توابع هدف مسئله است. هر کروموزم دارای سه مقدار برازش برای هریک از توابع هدف اقتصادی، اجتماعی و اثرات محیطزیستی است. بااستفاده از معادلات ۱، ۸ و ۱۵ منافع

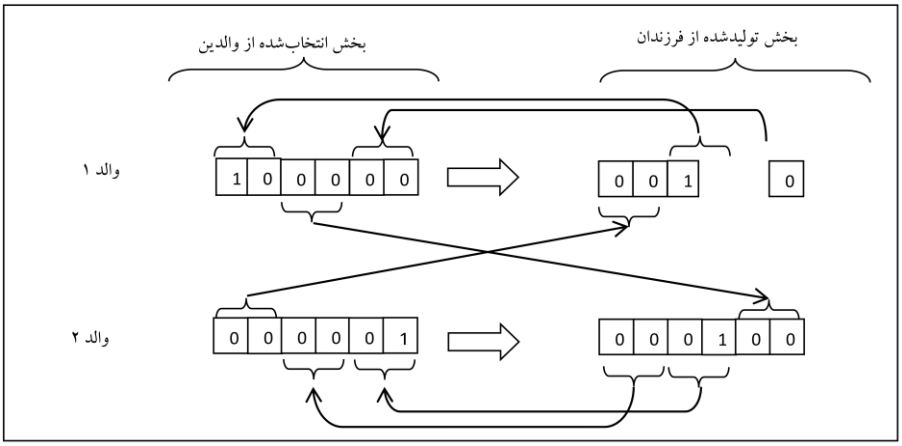
1. Fitness function

اقتصادی، اجتماعی و محیطزیستی برای هر کروموزم محاسبه می‌شود که در شکل ۴ این فرآیند نمایش داده شده است.



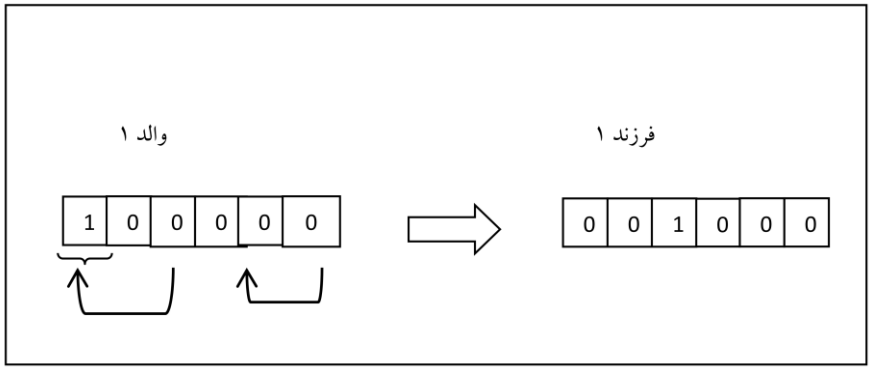
شکل۴. مثال برای تابع برازش

عملگر تقاطع. عملگر تقاطع مبتنی بر بخش، برای تولید کروموزوم جدید از جمعیت به‌کار گرفته شده است [۲،۳]. این عملگر مبتنی‌بر تقاطع یکنواخت است؛ یعنی هر بخش از کروموزم فرزند به تصادف با شانس یکسان از میان بخش والدین انتخاب می‌شود. مقدار یک در ژن‌ها به این معنی است که بخش انتخابی از والدین خصوصیات ژنی خود را به فرزندان انتقال می‌دهند. مقدار صفر معنایی غیر از این دارد. بااستفاده از این اپراتور توسط والدین، دو فرزند تولید می‌شودد. همان‌گونه که در شکل ۵ می‌بینیم، درمورد این مسئله عملگر تقاطع براساس جابه‌جایی بخش‌های دو کروموزم والد انجام می‌پذیرد. این عملگر از یک آرایه صفر و یک استفاده می‌کند که تعداد درایه های آن برابر با تعداد بخش‌های یک کروموزم است. این عملگر برای هر n قطعه به‌کار می‌رود.



شکل ۵. عملیات تقاطع

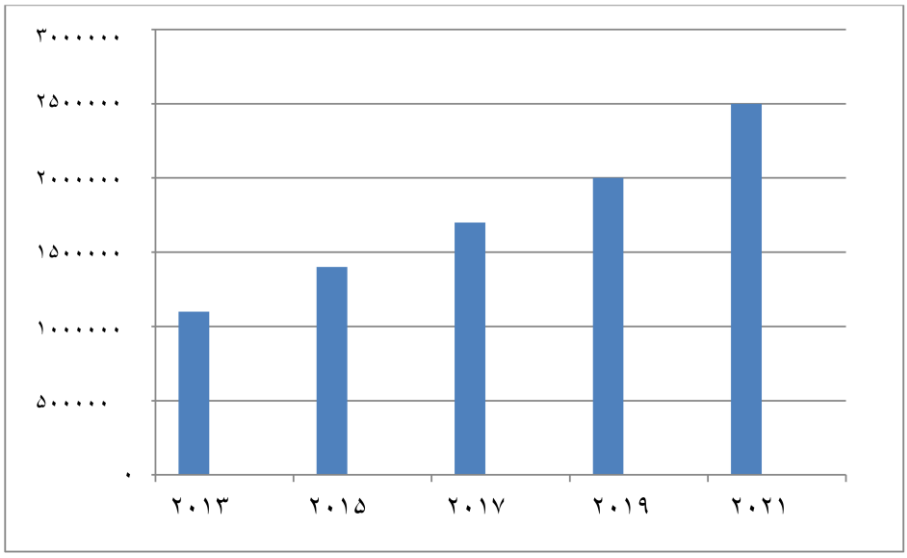
عملگر جهش. مشابه عملگر تقاطع، جهش مبتنی‌بر بخش که بخش‌های آن مقادیر صفر و یک دارند، به‌کار گرفته می‌شود. این عملگر به‌طور تصادفی دو ژن را از بخش مربوط انتخاب می‌کند و جای آن‌ها را عوض می‌کند. عملگر جهش فقط روی ژن‌های یک کروموزم والد عمل می‌کند و یک فرزند تولید می‌کند. اگر مقدار درایه نظیر یکی از بخش‌های کروموزم عدد ۱ بگیرد، عملگر جهش در آن بخش به‌صورت تصادفی دو ژن را انتخاب می‌کند و مقادیر آن‌ها را با یکدیگر عوض می‌کند. شکل ۶ مثالی از جهش را نشان می‌دهد:



شکل ۶. عملیات جهش

متوقف‌کردن الگوریتم. شرایط توقف، تعداد تکرارها را محدود می‌کند. در این تحقیق شرایط توقف برابر یک عدد از پیش تعیین شده قرار داده می‌شود.

مورد مطالعه. یک رایانه شخصی پنتیوم چهار برای بررسی راهکارهای بازیابی قطعات انتخاب شده است. داده‌ها توسط مهندسی میدانی از بازار اسقاط به دست آمده است. بالغ بر یک میلیون رایانه از رده خارج در ایران وجود دارد. تعداد رایانه‌های از رده خارج و نرخ رشد آن‌ها را در نمودار ۱ نشان داده‌ایم:



نمودار ۱. رایانه‌های از رده خارج شده در ایران [۲۲]

شش گزینه برای بازیابی در پایان عمر درنظر گرفته شده است. قطعات رایانه موردبررسی و گزینه‌های بازیابی ممکن در پایان عمر برای هر قطعه را در جدول ۲ نشان داده‌ایم:

جدول۲. قطعات رایانه و گزینه های بازیافت در پایان عمر

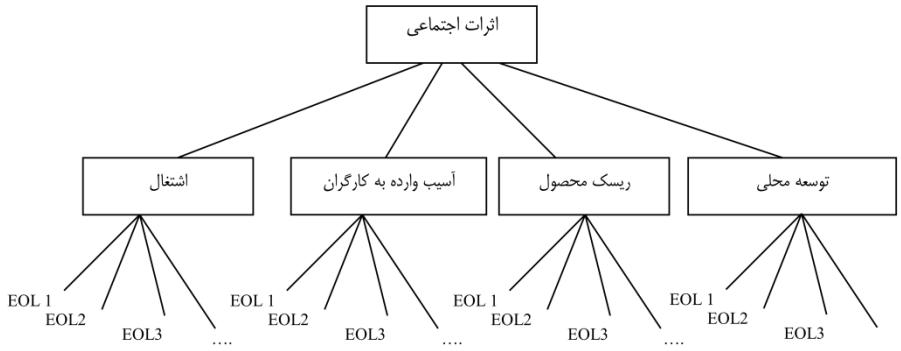
قطعه	صفحه نمایش	درایو نرم	صفحه‌کلید	درایو سخت	سی‌دی رام	برد اصلی
راهکارهای بازیابی قابل‌اعمال	RU-LF	RU-RC-LF	RU-RF-RM-RC-IN-LF	RC-LF	RF-RC-LF	RC-LF
قطعه	منبع تغذیه	کارت صدا	کارت گرافیکی	مودم	کابل‌ها	هوسینگ
گزینه پایان عمر	RU-IN-LF	RU-RC-LF	RC-LF	RU-RF-RC-LF	RU-RC-IN-LF	RU-RM-RC-LF

داده‌های ورودی را به‌عنوان نمونه برای صفحه‌کلید در جدول ۳ نشان داده‌ایم:

جدول۳. ارزش اقتصادی هر گزینه پایان عمر برای صفحه‌کلید

RU	RF	RM	RC	IN	LF
۰/۳۰	۴/۹۲	۵/۵۹	۴/۵۲	۰/۱۵	۶/۸۲

روش AHP مرحله‌ای (تکنیک حداقل مجذورات لگاریتمی) [۳۳] براساس نظرات خبرگان، برای تخمین اثرات اجتماعی هر گزینه پایان عمر به‌کار گرفته شده است. سلسله‌مراتب تصمیم‌گیری برای اثرات اجتماعی برای گزینه‌های بازیافت در پایان عمر در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل گزینه‌های پایان عمر ۱ تا ۶ به‌ترتیب استفاده مجدد، پرداخت مجدد، ساخت مجدد، بازیافت، سوزاندن و دفن هستند.



شکل ۷. سلسله‌مراتب اثرات اجتماعی

از خبرگان خواسته شد بااستفاده از اعداد مثلثی مرحله‌ای، ابتدا گزینه‌های مختلف بازیابی را براساس هریک از معیارهای چهارگانه برای اثرات اجتماعی انتخاب کنند و سپس معیارهای چهارگانه را نسبت به هم باتوجه به اثرات اجتماعی مقایسه کنند.

ماتریس مقایسه زوجی چهار معیار اجتماعی، یعنی توسعه محلی، ریسک محصول، آسیب وارده به کارگران و اشتغال نسبت به یکدیگر نیز تشکیل می شود.

محاسبه وزن‌های اولیه برای ماتریس‌های مقایسه گزینه‌ها؛ نیز تشکیل می شود.

ماتریس وزن‌های نرمال شده؛ نیز به دنبال ان محاسبه می شود.

و اثرات اجتماعی هر گزینه پایان عمر از حاصل‌ضرب وزن‌های نرمال‌شده در وزن نسبی معیارها به‌دست می‌آید (جدول ۴)

جدول ۴. اثرات اجتماعی گزینه‌های مختلف بازیافت برای صفحه‌کلید

گزینه پایان عمر	اثرات اجتماعی (100×)
RU	۳/۸
RF	۲/۹
RM	۴/۳
RC	۲/۳
IN	۲/۷
LF	۴/۷

برای محاسبه اثرات محیطزیستی هر گزینه پایان عمر از نرم‌افزار سیماپرو[1] [۳۸] استفاده شده است. سیماپرو یک ابزار است که به‌صورت وسیعی در سطح بین‌الملل برای بیشتر مطالعات ارزیابی چرخه عمر (LCA) استفاده شده است [۲۸، ۱۶] در این مقاله سیماپرو نسخه شش دانشجوی دکتری استفاده شده است. نوع و وزن مواد هر قطعه از محصول و فرآیند موردنیاز برای انجام بازیافت در هر گزینه، به‌عنوان داده‌های ورودی برای محاسبات اثرات محیطزیستی در سیماپرو درنظر گرفته می‌شود. با به‌کارگیری این داده‌ها و پایگاه داده کلی سیماپرو، اثرات محیطزیستی محاسبه شده است (رویه زیر را ببینید).

یک رویه برای محاسبه اثرات محیطزیستی به‌وسیله سیماپرو:

۱. داده‌های ورودی، شامل نوع مواد، وزن محصول و رویه‌های بازیافت پایان عمر؛

۲. محاسبه اثرات محیطزیستی برای فرآیند بازیافت یا مواد براساس اثر گلخانه‌ای، انرژی و ...؛ نرمال‌کردن اثرات به‌دست آمده از قدم قبل؛

۳. تبدیل اعداد نرمال قدم بالا به واحد Eco-point.

نتایج نمونه برای صفحه‌کلید در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. اثرات محیطزیستی (برحسب میلی‌پوینت) برای هریک از گزینه‌های پایان عمر برای صفحه‌کلید

گزینه پایان عمر	RU	RF	RM	RC	IN	LF
اثرات محیطزیستی	۰/۲	۷/۰۸	۷/۸۸	۵/۷۲	۹/۰۶	۱۲/۲۲

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

1. Simapro

برای حل مسئله مطالعه موردی، ابزار NSGA-II به‌کار گرفته شد. بعد از انجام تعدادی آزمایش اولیه، نرخ تقاطع، نرخ جهش و اندازه جمعیت، به‌ترتیب ۰/۶ و ۰/۱ و ۱۰۰ انتخاب شد. الگوریتم بعد از ۱۲۵ تکرار متوقف شد و ۱۹ جواب متفاوت حاصل در جدول ۶ لیست شده‌اند.

جدول ۶: جواب‌های بهینه موضعی از مطالعه مورد

شماره جواب	مقدار اقتصادی	مقدار محیط‌زیستی	مقدار اجتماعی
۱	۴۸۳/۶	۵۱۸/۱	۲۸۰
۲	۵۰۲/۲	۵۱۰/۶	۲۱۷
۳	۴۹۲/۵	۴۴۹/۳	۲۷۰
۴	۵۱۷/۳	۴۶۲/۱	۲۴۵
۵	۴۹۹/۱	۴۵۲/۱	۲۰۵
۶	۴۹۲/۳	۴۵۰/۰	۱۹۰
۷	۵۰۱/۷	۵۰۲/۷	۲۴۰
۸	۴۹۸/۷	۴۵۳/۴	۲۱۰
۹	۵۰۹/۱	۴۵۷/۳	۲۹۰
۱۰	۵۱۸/۲	۵۰۵/۴	۲۸۰
۱۱	۵۰۲/۲	۴۶۰/۱	۲۲۰
۱۲	۵۱۲/۴	۵۰۷/۳	۲۶۰
۱۳	۵۱۲/۶	۵۰۶/۶	۲۵۸
۱۴	۴۹۰/۲	۴۵۲/۱	۲۰۰
۱۵	۵۱۵/۳	۵۰۱/۳	۲۵۰
۱۶	۵۱۷/۷	۴۶۰/۸	۲۴۰
۱۷	۴۹۱/۶	۵۰۹/۴	۲۲۰
۱۸	۵۱۴/۱	۵۰۷/۸	۲۳۰
۱۹	۵۱۸/۶	۵۰۰/۲	۲۳۰

این جواب‌ها بیانگر ترجیحات تصمیم‌گیرنده هستند. برای توضیحات بیشتر ابتدا مسئله با تنها یک تابع هدف حل شده است. نتایج بهینه برای هر تابع هدف (f_j^*) محاسبه شده است. با درنظر گرفتن تنها تابع هدف اقتصادی در مدل مقادیر ۴۹۰/۲ و ۴۵۲/۱ و ۲۱۷ به‌ترتیب برای توابع هدف اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی به‌دست آمده است. اگر تنها هدف محیط‌زیستی در مدل درنظر گرفته شود، مقادیر ۴۹۲٫۳ و ۴۵۰٫۰ و ۲۰۵ به‌ترتیب برای توابع هدف اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی به‌دست می‌آید. درپایان با درنظر گرفتن تنها تابع هدف اجتماعی مقادیر ۵۰۱/۷ و ۵۰۲/۷ و ۲۹۰ به‌ترتیب برای توابع هدف اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی به‌دست می‌آید. سپس درصد

انحراف وزنی بین یک جواب بهینه موضعی f_j^i که به معنی مقدار تابع هدف jام برای جواب iاست و f_j^* طبق معادله ۱۹ محاسبه می‌شود [۱۰].

$$WPD_i = \sum_{j=1}^{3} W_j \frac{\left|f_j^i - f_j^*\right|}{f_j^*}$$ رابطه ۱۹

W_j وزن هر تابع هدف است که توسط تصمیم‌گیرنده تعریف می‌شود و بیانگر اهمیت هر تابع هدف است. ازآنجاکه توابع هدف متفاوت دارای واحدهای مختلف هستند، فواصل ازطریق تقسیم بر مقدار هدف تکی، نرمال می‌شوند. درصد انحراف وزنی ۰,۷ و ۰,۲ و ۰,۱ به‌ترتیب برای توابع هدف اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی محاسبه شده است. درصد انحرافات وزنی محاسبه‌شده برای جواب‌های جدول ۶ در جدول ۷ آمده است.

جدول۷. جواب‌های بهینه موضعی وزنی از مطالعه موردی

شماره جواب	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰
درصد انحراف وزنی	۴/۷۰	۴/۷۰	۸/۷۰	۹/۲۰	۴/۶۳	۴/۶۰	۴/۳۲	۴/۵۷	۴/۳۴	۴/۵۱
شماره جواب	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	
درصد انحراف وزنی	۴/۰۲	۴/۵۵	۴/۳۰	۳/۹۹	۴/۴۸	۴/۱۴	۸/۱۰	۴/۶۰	۴/۵۰	

درصد انحراف وزنی یک تحلیل مناسب از جواب بهینه موضعی می‌دهد. به همان مقدار که درصد انحراف وزنی کم باشد، توافق بین ترجیحات تصمیم‌گیر بیشتر خواهد شد. ذی‌نفع می‌تواند جواب بهینه موضعی را براساس ترجیحات خود درمورد هر تابع هدف تعریف‌شده به‌وسیله درصد انحراف وزنی انتخاب کند. از آنجا که مقدار تابع هدف سود در جواب ۱۴ مساوی با مقدار ایده‌آل است و کمترین درصد انحراف وزنی را دارد، به‌نظر می‌رسد این جواب بهترین جواب در مجموعه جواب‌های بهینه موضعی باشد. برای این جواب به‌خصوص نتیجه انتخاب گزینه پایان عمر برای قطعات رایانه در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. گزینه‌های پایان عمر برای جواب بهینه موضعی

قطعه	صفحه‌نمایش	درایو نرم	صفحه‌کلید	درایو سخت	سی‌دی رام	برد اصلی
گزینه پایان عمر	RF	RC	RM	RC	RE	RC
قطعه	منبع تغذیه	کارت صدا	کارت گرافیکی	مودم	کابل‌ها	هوسینگ
گزینه پایان عمر	IN	LF	LF	RE	IN	RC

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف این مقاله توسعه یک مدل ریاضی چند هدفه (MOMM) برای ارزیابی و انتخاب استراتژی‌های مناسب برای بازیافت محصولات الکتریکی و الکترونیکی در پایان عمرشان است؛ به سخن دیگر، هدف این تحقیق ایجاد یک سیستم پشتیبان تصمیم برای بازیابی محصولات الکتریکی و الکترونیکی مستهلک‌شده، براساس ابعاد توسعه پایدار است. باتوجه به مفهوم توسعه پایدار اهداف مدل توسعه داده شده عبارتند از حداکثر کردن منافع اقتصادی و اجتماعی و حداقل کردن اثرات محیطزیستی ناشی از عمل‌آوری ضایعات محصولات الکتریکی و الکترونیکی و فعالیت‌های مرتبط با آن. اثرات محیطزیستی هر گزینه پایان عمر برای بازیافت بااستفاده از نرم‌افزار سیماپرو به‌دست آمده است. همچنین از روش AHPمرحله‌ای برای محاسبه اثرات اجتماعی استفاده کردیم. NSGA-II را برای پیداکردن جواب‌های بهینه موضعی استفاده شده است. برای فراهم‌شدن یک دید مناسب از جواب‌ها، مفهوم درصد انحراف وزنی را معرفی و یک مطالعه موردی (رایانه) برای کاربرد مدل توسعه داده شده بررسی شد. به‌عنوان کار تحقیقاتی آتی می‌توان به مسئله تصمیم‌گیری انتخاب سطح تجزیه قطعات محصول برای بازیابی، همراه با درنظر گرفتن تمام گزینه‌های ممکن بازیابی درقالب یک مسئله تصمیم‌سازی چندمعیاره به‌عنوان یک مدل یکپارچه اشاره کرد. خروجی این مدل می‌تواند به‌عنوان ورودی یک مسئله طراحی شبکه بازیابی WEEE درنظر گرفته شود. همچنین می‌توان متغیرهای کیفی را برای معیارهای اجتماعی درنظر گرفت که می‌تواند مسئله را پربارتر و روش حل را تغییر دهد.

منابع

1. Abu Baker MS, Rahimifard S (2008).Ecological and economical assessment of end-of-life waste recycling in the electrical and electronic recovery sector.*Sustainable Development. 1(4),*261-277.

2.Ahluwalia P. K, Nema A. K (2007). A life cycle based multiobjective optimization model for the management of computer waste. Resources, Conservation and Recycling. 51, 792–826.

3. Altiparmak F, Gen M, Lin L, Paksoy T (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks.Computers and Industrial Engineering. 51, 197–216.

4.Behdad S, Kwak M, Kim H, Thurston D (2010). Simultaneous selective disassembly and End-of-life decision making for multiple products that share disassembly operations. *Mechanical Design, 132(4),* 041002-041009.

5.Bereketli I, Genevois M, EsraAlbayrak Y, Ozyol M (2011).Weee treatment strategies' evaluation using fuzzy LIMAP method.*Expert System with Application.38,*71-79.

6.Bufardi A, Gheorghe R, Kiritsis D, Hirouchakis P (2004). Multi-criteria decision aid approach for product end-of-life alternative selection.Production Research. 42 (16): 3139–3157.

7.Carter CR, Jennings MM (2002). Logistics social responsibility: an integrative framework. *Business Logistics, 23(1),*145–80.

8.Chan J (2008). Product end-of-life alternatives selection: grey relational analysis approach. *Production Research, 46(11),* 2889-2912.

9.Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T (2002). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computations.6,182–97.

[10.Dehghanian F, Mansour S (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm.Resources, Conservation and Recycling.*53,* 559–570.

11.Dhouib D, Elloumi S (2011). A new multi-criteria approach dealing with dependent and heterogeneous criteria or end-of-life product strategy. *Applied Mathematics and Computation, 218,*1668-1681

12.De Brito MP (2003). Managing reverse logistics or reversing logistics management, Ph.D. Thesis, Erasmus Research Institute of Management. Rotterdam, Netherlands.

13.European Commission (2003a).Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE), OJ L 37/24, 13.02.2003, Brussels, Belgium.

14.European Commission, (2003b). Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment, OJ L 37/19, 13.02.2003, Brussels, Belgium.

15.Gheorghe R.A, Bufardi A, Xirouchakis P (2005). Fuzzy multi-criteria decision aid method for conceptual design. *Manufacturing Technolog, 54,* 151-154.

16.Giudice F, Fargione G (2007). Disassembly planning of mechanical systems for service and recovery: a genetic algorithms based approach. *Intelligent Manufacturing, 18,* 313–329.

17.Giudice F, Kassem M (2009). End-of-life impact reduction through analysis and redistribution of disassembly depth: a case study in electronic device redesign. *Computers and Industrial Engineering, 57,* 677–690.

18.Hikwama B.P (2005). Life cycle assessment of a personal computer.BE Thesis, University of Southern Queensland. Toowoomba, Australia.

19.Huisman J, Ruediger K, Mauer C (2007). Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE).United Nations University. Tokyo, Japan.

20.Iakovou E, Moussiopoulos N, Xanthopoulos A, AchillasCh, Michailidis N, Chatzipanagioti M, Koroneos C, Bouzakis K.D, Kikis V (2009). A methodological framework for end-of-life management of electronic products.Resources, Conservation and Recycling. *53*,329-339.

21.Ijomah W, Bennett J.P, Pearce J (1999). Remanufacturing evidence of environmental conscious business practice in UK.First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing.p.192-196.Tokyo, Japan.

22.Iran department of environment website (2013).www.doe.ir/portal. Accessed 23 June 2013

23.Ishii K, Eubanks C.F, Di Marcob P (1994). Design for product retirement and material life cycle. Material Design. 15:225-233.

24.IRICA.(2013). http://www.irica.gov.ir/Portal/Home/.Accessed 23 June2013.

25.Khetriwal D.S, Kraeuchi P, Widmer R (2009). Producer responsibility for e-waste management: key issues for consideration learning from the Swiss experience. *Environmental Management, 90,* 153-165

26.Kuo T.C (2013). Waste electronics and electrical equipment disassembly and recycling using Petri net analysis: considering the economic value and environmental impacts. *Computers and Industrial Engineering, 65(1),* 54-64.

27.Lee S.G, Lye S.W, Khoo M.K (2001). A multi-objective methodology for evaluating product end-of-life options and disassembly.*Advanced Manufacturing Technology, 18,* 148-156.

28.Mangun D. C, Thurston, D. L (2002). Incorporating component reuse, remanufacture, and recycle into product portfolio design. *IEEE Transactions on Engineering Management, 49,*479–490.

29.Nnorom I. C, Osibanjo O (2008). Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. *Resources, Conservation and Recycling, 52,* 843–858.

30.RoHS, (2003).RoHS Directive. (accessed 23 June 2013).

30.Rose C.M, Ishii K, Stevels A (2001). ELDA and EVCA: tools for building product end-of-life Strategy. *Sustainable Product Design, 1,* 181-195.

31.Roy B (1978). ELECTREIII: Algorithm de classement base surune representation floue des preferences en presence des criteres multiples. *Cahiers du CERO, 20,* 3-24.

32.Shokohyar S, Mansour S, Karimi B (2012). A model for integrating service and product EoL management in sustainable product service system (S-PSS).Intelligent Manufacturing.doi: 10.1007/s10845-012-0694-x

33.Saaty TL (1980). The Analytical Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, New York, USA.

34.Simapro (2013).Software for environmental assessment.www.pre. nl/simapro. Accessed 23 June 2013