



## ۱. مقدمه

محصولات الکتریکی متنوعی چون رایانه، چاپگر، تلویزیون، یخچال، تلفن همراه، پخش‌کننده موزیک، تجهیزات دارویی و ... در پایان عمرشان به‌عنوان ضایعات تجهیزات الکتریکی در نظر گرفته می‌شوند. اهمیت روبه‌فزونی بازیابی و مقوله‌های مرتبط با توسعه پایدار، باعث ایجاد بحث‌های جدیدی در مورد 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 هر ساله، جهان بالغ بر ۵۰ میلیون تن ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی تولید می‌کند. این رشد به دلیل 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؛ به همین دلیل 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، به طوری که دوستدار محیط‌زیست باشد، دستورالعمل‌های مختلفی برای سازندگان تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی تدوین شده است [۱۷]؛ از جمله می‌توانیم به قوانینی چون دستورالعمل ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی<sup>۱</sup> (WEEE) و مسئولیت وسیع تولیدکننده<sup>۲</sup> (EPR) و محدودیت روی مواد خطرناک<sup>۳</sup> (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، آرسنیک و جیوه را در تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی محدود کرده است [۳۰] و دستورالعمل 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 از طریق مسئولیت بازیابی محصول و توسعه محصول به روشی سازگار با محیط‌زیست است [۲۹]. شرکت‌های بزرگ در سراسر جهان در حال پاسخگویی به این قوانین هستند؛ در نتیجه مدیریت ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی یک زمینه کاری مورد علاقه 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. در ادامه، راهکارهای بازیابی ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی در پایان عمرشان را که برگرفته از ادبیات موضوع است، ارائه می‌کنیم:

استفاده مجدد<sup>۱</sup> (RU): استفاده اقلام توسط مشتری دوم بدون عملیات تعمیر قبلی یا مطابق طراحی اولیه استفاده؛

پرداخت مجدد<sup>۲</sup> (RF): فرایند بازگردانی قطعات به یک وضعیت قابل‌رضایت یا کارکردی مطابق مشخصات اصلی، با استفاده از روش‌هایی مانند کار مجدد، رنگ‌آمیزی مجدد و ...؛

ساخت مجدد<sup>۳</sup> (RM): فرایند بازآوری اقلام مونتاژی به شرایط کارکردی اولیه، از طریق جای‌گذاری یا ساخت مجدد قطعات؛

بازیافت<sup>۴</sup> (RC): فرایند گرفتن مواد قطعات و کار روی آن‌ها برای ساختن مواد مشابه یا مفید؛

دورریز<sup>۵</sup> (DP): فرایند سوزاندن و دفن کردن؛

سوزاندن<sup>۶</sup> (IN): سوزاندن مواد زاید برای تولید انرژی، در صورتی‌که بازیافت مواد و قطعات امکان‌پذیر نباشد؛ البته با توجه به جنس مواد ممکن است این عملیات بدون بازیافت انرژی گرمایی باشد؛

دفن کردن<sup>۷</sup> (LF): دورریختن ضایعات و دفن کردن آن‌ها در مکان‌های مشخص؛ در صورتی‌که بازیافت مواد و قطعات امکان‌پذیر نباشد [۲۱].

در انتخاب گزینه پایان عمر برای بازیابی یک محصول، به‌دست آوردن ارزش اقتصادی و در نظر گرفتن اثرات اجتماعی و محیط‌زیستی 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 به کار گرفته شده است. این مدل همچنین در بازیافت همه نوع ضایعات الکترومکانیکی می‌تواند به کار 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 در غیر این صورت دفن می‌شوند؛ در حالی که بیشتر قطعات استفاده مجدد، پرداخت مجدد، ساخت مجدد و بازیافت خواهند شد. بقیه مقاله به صورت 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 توسعه یافته با به کارگیری 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؛ از جمله می‌توانیم از کاربرد مفهوم WEEE و مدیریت آن در لجستیک معکوس (به خصوص 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 در نظر گرفته‌اند.

ابویکر و رحیمی‌فرد [۱] در ارزیابی یخچال از ابزاری به نام  $ECO^2$  استفاده کردند. آن‌ها تنها از دو گزینه موجود برای ارزیابی 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 بر اساس معیارهای اقتصادی و محیط‌زیستی به کار بردند. خروجی مدل مجموعه‌ای از گزینه‌های اولویت‌بندی شده بود که این گزینه‌ها قبلاً توسط مؤلفان تعریف شده بود. آن‌ها پنج گزینه ارزیابی در نظر گرفتند که هر گزینه شامل ترکیبات مختلف راهکارهای ارزیابی تعریف شده 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 در نظر 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 چنانچه [۸] انتخاب راهکارهای بازیابی را به‌عنوان یک مسئله تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره در نظر گرفت و برای حل مسئله روش تحلیل رابطه خاکستری<sup>۱</sup> (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 در نظر گرفته شد. گزینه‌های محدودی برای بازیابی در این مقاله در نظر گرفته شده است. کو [۲۶] مسئله تجزیه قطعات و بازیابی ضایعات تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی را در نظر گرفت. او روش تحلیل شبکه‌های پتری<sup>۲</sup> (PNA) را برای حل مسئله تجزیه قطعات WEEE به‌کار گرفت. برای تجزیه قطعات، روش پیشنهاد شده مبتنی بر PNA، اثرات محیط‌زیستی و هزینه را به‌عنوان معیارهای اصلی برای انتخاب بهترین سناریو در نظر 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 در نظر گرفته شدند. بهداد و همکاران [۴] در روشی دیگر، مسائل تجزیه قطعات و مرحله پایان عمر را هم‌زمان در نظر 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 در نظر گرفته شدند؛ هرچند گزینه‌های پایان عمر محدودی، آن‌ها هم تنها از دیدگاه اقتصادی، در این کار تحقیقاتی در نظر 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 در نظر گرفته شده		
			اقتصادی	محیط‌زیستی	اجتماعی		RM	RC	DP
[۲۳]	Linker Software	x	✓	✓	x	x	✓	✓	x
[۳۰]	EoL design	x	✓	✓	x	x	✓	✓	x
[۶]	ELECTR EIII	x	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓
[۸]	Gray rational analysis	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	x
[۱۱]	PROMPT HEEII	x	✓	✓	x	✓	✓	✓	x
[۲۷]	Mathematical model	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	x
[۱]	Eco2 methodology	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	x
[۳۲]	Mathematical model	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	x
[۲۶]	Pertinet analysis	x	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓
مقاله اخیر	Mathematical model	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش یک مدل ریاضی چندهدفه<sup>۱</sup> (MOMM) را توسعه می‌دهد که سه معیار اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی را با هم در نظر گرفته و تمام گزینه‌های ممکن را برای ارزیابی یک محصول الکتریکی و الکترونیکی مورد توجه قرار می‌دهد و در پایان، به طور مشخص بهترین گزینه را برای ارزیابی هر قطعه ارائه می‌کند.

ارزیابی یک محصول با ۱۲ قطعه و ۶ گزینه پایان عمر، نیاز به در نظر گرفتن  $6^{12}$  جواب ممکن دارد. هر یک از این جواب‌ها سه مؤلفه اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی دارند که بیانگر ارزش‌نهایی ارزیابی گزینه‌های متفاوت برای قطعات مختلف هستند. مقایسه همه این جواب‌ها در یک زمان منطقی، در حالت کلی دشوار است. روش MOGAII برای انتخاب گزینه‌های ارزیابی در پایان عمر یک محصول برای حل مدل ریاضی سه‌هدفه به کار 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 ارزیابی محصولات در پایان عمر، انتخاب گزینه مناسب پایان عمر برای هر قطعه از محصول با توجه به معیارهای اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی مورد توجه است. شش گزینه ارزیابی 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 از لحاظ اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی دارند. چهار شاخص برای اثرات اجتماعی شامل اشتغال، آسیب به کارگران، توسعه محلی و ریسک محصول [۷، ۱۲، ۲] مورد توجه قرار گرفته است.

اهداف مدل به صورت زیر هستند:

۱. بیشینه کردن اثرات منافع اقتصادی حاصل از بازیابی محصول در مرحله پایان عمر؛
۲. مینیمم کردن اثرات مخرب محیط‌زیستی حاصل از بازیابی محصول در مرحله پایان عمر؛
۳. بیشینه کردن منافع اجتماعی حاصل از بازیابی محصول در مرحله پایان عمر.

**مدل ریاضی.** در این بخش، مدل ریاضی مسئله را ارائه می‌کنیم. پارامترها و متغیرهای تصمیم به صورت زیر بیان می‌شوند:

### پارامترها

$n$ : تعداد قطعات

$m$ : تعداد گزینه‌های بازیابی

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

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

$j=1$  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 سوار کردن 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  $i$

- $G_{ji}$ : 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 سوار کردن 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 نرمال شده معیار اشتغال
- $EM_{ji}$ : امتیاز معیار اشتغال در بازیابی قطعه  $i$  با استفاده از روش  $j$
- $NW_{dw}$ : وزن نرمال شده معیار شرایط کاری
- $DW_{ji}$ : امتیاز معیار شرایط کاری در بازیابی قطعه  $i$  با استفاده از روش  $j$
- $NW_{td}$ : وزن نرمال شده معیار توسعه محلی
- $LD_{ji}$ : امتیاز معیار توسعه محلی در بازیابی قطعه  $i$  با استفاده از روش  $j$
- $NW_{pr}$ : وزن نرمال شده معیار ریسک محصول
- $PR_{ji}$ : امتیاز معیار ریسک محصول در بازیابی قطعه  $i$  با استفاده 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.

$i=1, \dots, 12$  و  $j=1, \dots, 6$

**سه تابع هدف.** تابع هدف اقتصادی با توجه به پارامترهای بالا عبارت است از:

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

که

$$C_{1i} = CT \quad \text{رابطه ۲}$$

$$C_{2i} = CT + CD + CP_i + CA \quad \text{رابطه ۳}$$

$$C_{3i} = CT + CD + CRM_i + CA \quad \text{رابطه ۴}$$



$$C_{4i} = CT + CR_i \quad \text{رابطه ۵}$$

$$C_{5i} = CT + CIN_i \quad \text{رابطه ۶}$$

$$C_{6i} = CT + CLF_i \quad \text{رابطه ۷}$$

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 به ترتیب هزینه‌های سوزاندن و دفن کردن قطعات را نشان می‌دهند که شامل هزینه‌های جمع‌آوری و سوزاندن و دفن کردن هستند.

تابع هدف محیط‌زیستی عبارت است از:

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

که

$$E_{1i} = ET \quad \text{رابطه ۹}$$

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

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

$$E_{3i} = ET + ER_i \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$E_{6i} = ET + EIN_i \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$E_{5i} = ET + ELF_i \quad \text{رابطه ۱۴}$$

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:

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

محدودیت‌های مدل به صورت زیر هستند:

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

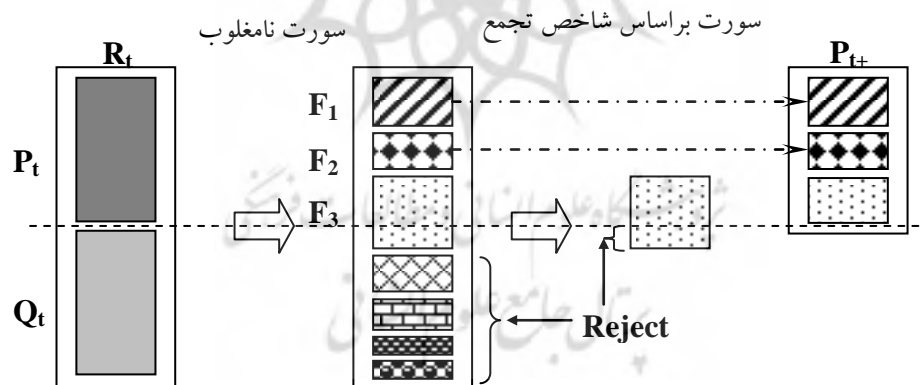
$$\sum_{j=1}^m x_{ji} = 1 \quad \text{رابطه ۱۶}$$

ب. متغیرهای تصمیم تنها مقادیر صفر و یک می‌گیرند.

$$x_{ji} = 0, 1 \quad \text{رابطه ۱۷}$$

**روش حل.** الگوریتم NSGAI<sup>۱</sup> [۱۰] برای یافتن جواب بهینه موضعی برای برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه بالا به کار 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 به تفصیل 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  $2N$  تشکیل می‌دهند و سپس با استفاده از مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۲</sup> کروموزوم‌های جمعیت  $R_t$  در سطوح نامغلوب<sup>۳</sup> (یا پارتو) طبقه‌بندی می‌شوند؛ بدین صورت که سطح اول، شامل جواب‌هایی است که توسط هیچ‌یک از جواب‌های دیگر مغلوب نمی‌شوند. بدون در نظر 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  $N$  با استفاده از کروموزوم‌های متعلق به سطوح بالاتر تشکیل می‌شود؛ به این ترتیب  $N$  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 به جای انتخاب دلخواه کروموزوم‌ها، از تورنمنت تجمع برای انتخاب اعضای آخرین سطح پارتوی مجاز استفاده می‌شود. شکل ۱ به صورت 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  $I_i$  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 رؤس 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:

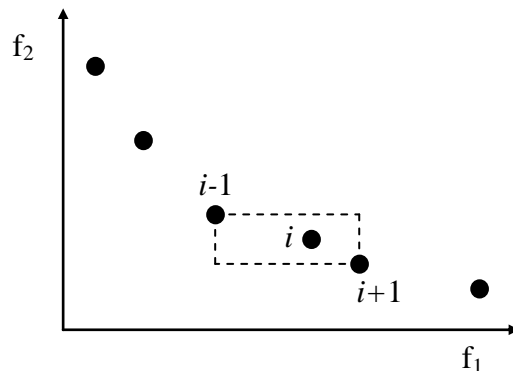
گام ۱. تعداد جواب‌های متعلق به  $F$  را معادل  $|F| = l$  بگیرید. برای هر جواب  $i$  متعلق به  $F$  قرار دهید.  $d_i = 0$

گام ۲. برای هر تابع هدف  $M$ ،  $m=1, 2, \dots, M$ ، 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.

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

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



شکل ۲. فاصله تجمع برای جواب  $i$

در ادامه، مراحل اجرای الگوریتم را به صورت گام به گام شرح می‌دهیم. ابتدا یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود و کروموزوم‌های آن در سطوح نامغلوب طبقه‌بندی می‌شوند. به هر یک از جواب‌ها مقدار برازندگی معادل شماره سطح نامغلوبی تخصیص می‌یابد که جواب متعلق به آن است. سپس از عملگر انتخاب براساس تورنمنت باینری (به همراه عملگر تورنمنت تجمع) و عملگرهای تقاطع و جهش برای تولید جمعیت فرزندان با اندازه  $N$  استفاده می‌شود. در زیر گام‌های مورد نیاز 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،  $P_{t+1} = \emptyset$  را در نظر بگیرید. شمارنده  $i$  را برابر یک فرض کنید. مادامی

$$\text{که } |P_{t+1}| + |F_i| < N, \text{ قرار دهید } P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i \text{ و } i = i + 1.$$

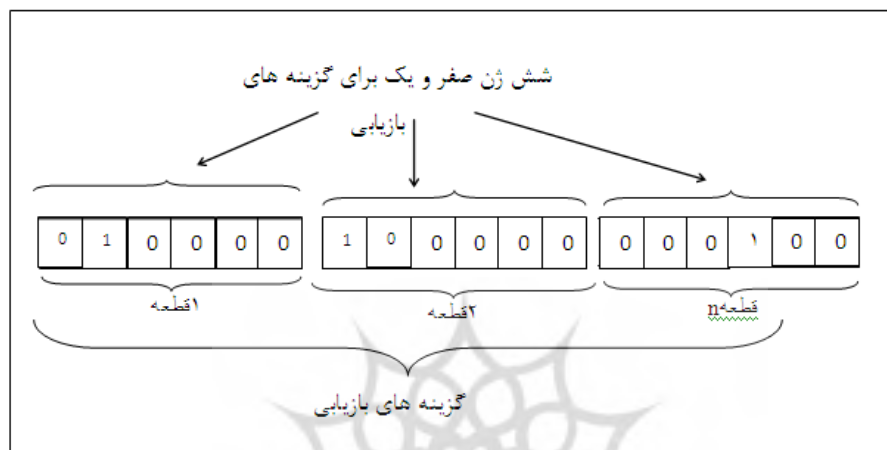
گام ۳. با استفاده از روش رتبه‌بندی تجمع<sup>۳</sup>،  $N - |P_{t+1}|$  جواب با بیشترین فاصله تجمع را از آخرین لبه پارتوی مجاز انتخاب کنید.

گام ۴. جمعیت فرزندان  $O_{t+1}$  را با استفاده از جامعه  $P_{t+1}$  و بر مبنای 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 کروموزوم تعدادی ژن صفر و یک دارد. گزینه‌های بازیابی برای پایان عمر هر قطعه به صورت یک کروموزوم  $J$  ژنی، مثلاً شش ژنی، در نظر 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 کروموزوم  $i \times j$  ناظر به در نظر گرفتن شش گزینه پایان عمر برای ۱۲ قطعه است. یک نمونه کروموزوم را در شکل ۳ نشان داده‌ایم.



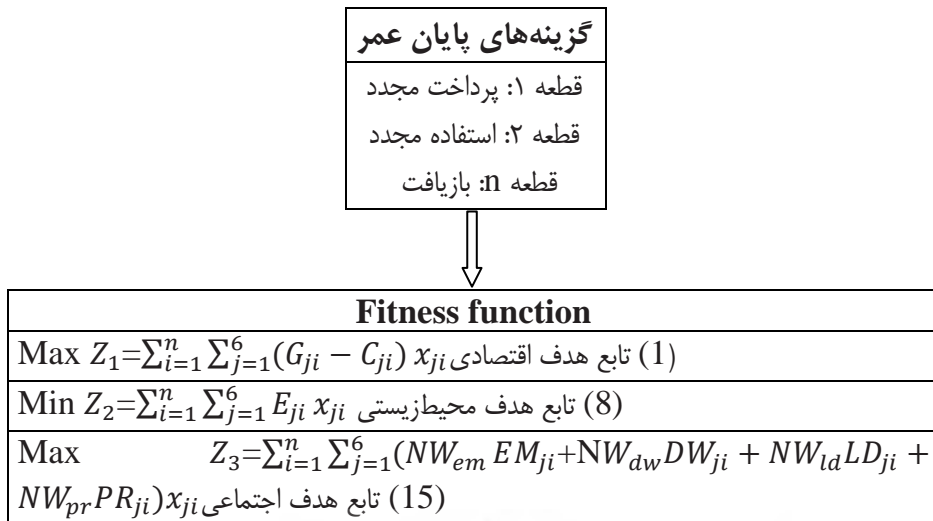
شکل ۳. نمایش کروموزوم برای الگوریتم ژنتیک

در این مثال، اولین شش ژن از کروموزوم 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<sup>۱</sup>.** در بهینه‌سازی چندهدفه نکته کلیدی این است که چگونه ارزش برازش برای هر کروموزوم در نظر گرفته شود. مقدار برازش هر کروموزوم نشان می‌دهد که چه مقدار آن کروموزوم در کسب اهداف موفق بوده است. هر قدر تابع برازش یک کروموزوم بیشتر باشد، احتمال بقای آن طی مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک بیشتر است. تابع برازش نشان‌دهنده کیفیت جواب مربوطه با در نظر گرفتن توابع هدف مسئله است. هر کروموزوم دارای سه مقدار برازش برای هر یک از توابع هدف اقتصادی، اجتماعی و اثرات محیط‌زیستی است. با استفاده از معادلات ۱، ۸ و ۱۵ منافع

1. Fitness function

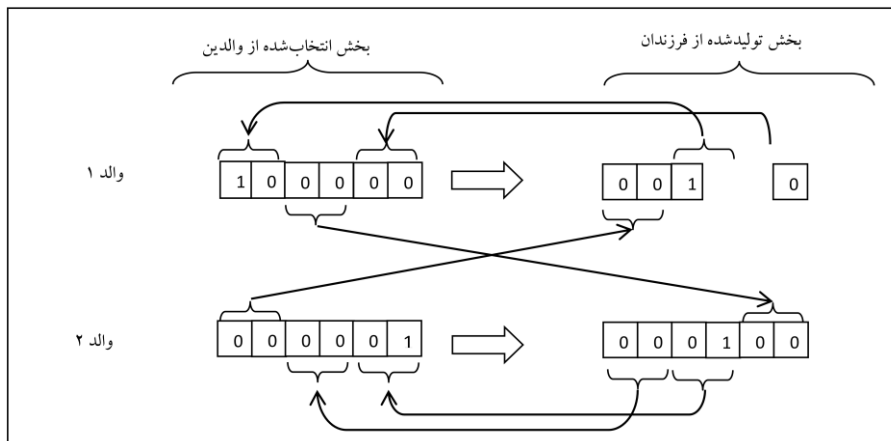
اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی برای هر کروموزوم محاسبه می‌شود که در شکل ۴ این فرآیند نمایش داده شده است.



شکل ۴. مثال برای تابع برازش

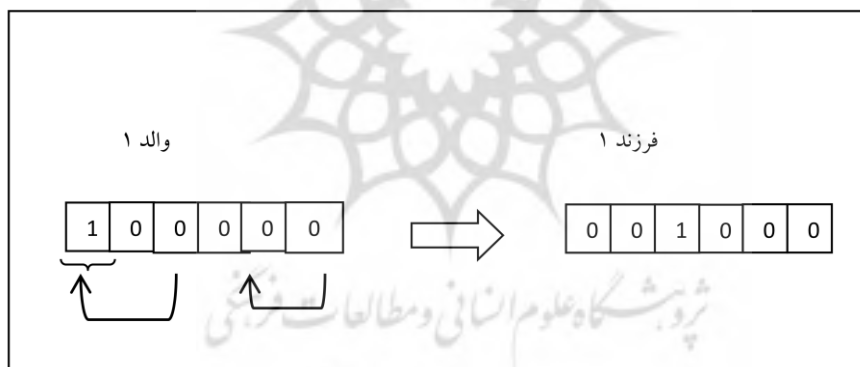
**عملگر تقاطع.** عملگر تقاطع مبتنی بر بخش، برای تولید کروموزوم جدید از جمعیت به کار گرفته شده است [۲،۳]. این عملگر مبتنی بر تقاطع یکنواخت است؛ یعنی هر بخش از کروموزوم فرزند به تصادف با شانس یکسان از میان بخش والدین انتخاب می‌شود. مقدار یک در ژن‌ها به این معنی است که بخش انتخابی از والدین خصوصیات ژنی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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
 رتال جامع علوم انسانی



شکل ۵. عملیات تقاطع

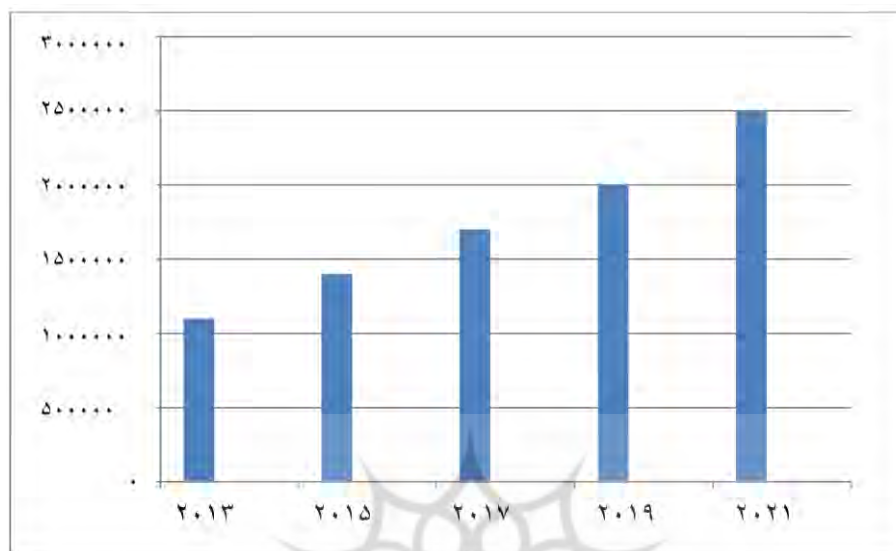
**عملگر جهش.** مشابه عملگر تقاطع، جهش مبتنی بر بخش که بخش‌های آن مقادیر صفر و یک دارند، به کار گرفته می‌شود. این عملگر به طور تصادفی دو ژن را از بخش مربوط انتخاب می‌کند و جای آن‌ها را عوض می‌کند. عملگر جهش فقط روی ژن‌های یک کروموزوم والد عمل می‌کند و یک فرزند تولید می‌کند. اگر مقدار درایه نظیر یکی از بخش‌های کروموزوم عدد ۱ بگیرد، عملگر جهش در آن بخش به صورت 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

**متوقف کردن 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 در نظر گرفته شده است. قطعات رایانه مورد بررسی و گزینه‌های بازیابی ممکن در پایان عمر برای هر قطعه را در جدول ۲ نشان داده‌ایم:

جدول ۲. قطعات رایانه و گزینه‌های بازیافت در پایان عمر

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

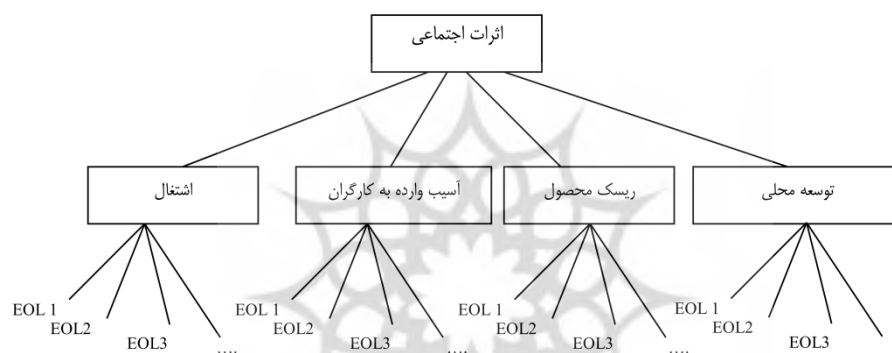


داده‌های ورودی را به‌عنوان نمونه برای صفحه‌کلید در جدول ۳ نشان داده‌ایم:

جدول ۳. 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 با استفاده 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 با توجه 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 می‌شود. محاسبه وزن‌های اولیه برای ماتریس‌های مقایسه گزینه‌ها؛ نیز تشکیل می‌شود. ماتریس وزن‌های نرمال شده؛ نیز به دنبال آن محاسبه می‌شود.

و اثرات اجتماعی هر گزینه پایان عمر از حاصل ضرب وزن‌های نرمال شده در وزن نسبی معیارها به دست می‌آید (جدول ۴)

جدول ۴. اثرات اجتماعی گزینه‌های مختلف بازیافت برای صفحه کلید

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

برای محاسبه اثرات محیط‌زیستی هر گزینه پایان عمر از نرم‌افزار سیماپرو<sup>۱</sup> [۳۸] استفاده شده است. سیماپرو یک ابزار است که به صورت 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 مورد نیاز برای انجام بازیافت در هر گزینه، به عنوان داده‌های ورودی برای محاسبات اثرات محیط‌زیستی در سیماپرو در نظر گرفته می‌شود. با به کارگیری این داده‌ها و پایگاه داده کلی سیماپرو، اثرات محیط‌زیستی محاسبه شده است (رویه زیر را ببینید).

یک رویه برای محاسبه اثرات محیط‌زیستی به وسیله 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 ...؛
  ۳. تبدیل اعداد نرمال قدم بالا به واحد Eco-point.
- نتایج نمونه برای صفحه کلید در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. اثرات محیط‌زیستی (برحسب میلی پوینت) برای هر یک از گزینه‌های پایان عمر برای صفحه کلید

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

#### ۴. 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  $0/6$  و  $0/1$  و  $100$  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 در نظر گرفتن تنها تابع هدف اقتصادی در مدل مقادیر  $490/2$  و  $452/1$  و  $217$  به‌ترتیب برای توابع هدف اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی به‌دست آمده است. اگر تنها هدف محیط‌زیستی در مدل در نظر گرفته شود، مقادیر  $492/3$  و  $450/0$  و  $205$  به‌ترتیب برای توابع هدف اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی به‌دست می‌آید. در پایان با در نظر گرفتن تنها تابع هدف اجتماعی مقادیر  $501/7$  و  $502/7$  و  $290$  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  $Z$  برای جواب  $i$  است و  $f_j^*$  طبق معادله ۱۹ محاسبه می‌شود [۱۰].

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

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

جدول ۷. جواب‌های بهینه موضعی وزنی از مطالعه موردی

شماره جواب	۱	۲	۳	۴	۵	۶	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 در مورد 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، به نظر 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

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

## 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 با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو به‌دست آمده است. همچنین از روش AHP مرحله‌ای برای محاسبه اثرات اجتماعی استفاده کردیم. NSGA-II را برای پیدا کردن 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 در نظر گرفتن تمام گزینه‌های ممکن بازیابی در قالب یک مسئله تصمیم‌سازی چندمعیاره به‌عنوان یک مدل یکپارچه اشاره کرد. خروجی این مدل می‌تواند به‌عنوان ورودی یک مسئله طراحی شبکه بازیابی WEEE در نظر گرفته شود. همچنین می‌توان متغیرهای کیفی را برای معیارهای اجتماعی در نظر 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, Esra Albayrak 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 Computation*. 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 Technol*, 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](http://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 June 2013.
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 sur une 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](http://www.pre.nl/simapro). Accessed 23 June 2013

