

# Dynamics of E-Waste Growth and Recycling

Ali Haji Gholam Saryazdi<sup>1\*</sup>, Ehsan Karimi Yazdi<sup>2</sup>, Seyed Mohammad Hosseini<sup>2</sup>,  
Hossein Raeisi<sup>2</sup>

1. Faculty Member, Imam Javad University College, Yazd, Iran.

2. B.Sc. Student in Industrial Engineering, Ardakan University, Yazd, Iran.

\*. Corresponding Author: a.saryazdi@iju.ir

Received: 3 August 2021

Revised: 2 January 2022

Accepted: 22 January 2022

## Abstract

In the age of digital economy, the use of electronic devices and consequently e-waste has increased so that e-waste is considered as the fastest growing waste in the world. Also, these wastes, like other wastes, have a detrimental effect on the environment. Therefore, control of e-waste and planning for its recycling is a management problem at the national, global and environmental levels. In this research, using the system dynamics approach and using document model building (DMB) and reviewing the literature, the dynamics model is designed to identify the structure governing the generation of e-waste and its recycling and predict the amount of e-waste and the capacity required for its recycling. The results of the model showed that although the amount of waste and consequently its recycling has increased, this growth is limited and is S-shaped. However, recycling industries have increased revenues.

**Keywords:** E-Waste, Digital Economy, Prediction, Systems Dynamics Approach, Document Model Building (DMB)

---

**Citation:** Haji Gholam Saryazdi, A., Karimi Yazdi, A., Hosseini, S. M., & Raeisi, H. (2022). Dynamics of e-Waste growth and its recycling [In Persian]. *Journal of Technology Development Management*, 9(4), 151-188. <https://dx.doi.org/10.22104/jtdm.2022.5114.2856>

---

## پویایی‌شناسی رشد ضایعات الکترونیکی و بازیافت آن

علی حاجی غلام سریزدی<sup>۱\*</sup>، احسان کریمی یزدی<sup>۲</sup>، سید محمد حسینی<sup>۲</sup>،

حسین رئیسی<sup>۲</sup>

۱. عضو هیئت علمی، موسسه آموزش عالی امام جواد (ع)، یزد.

۲. دانشجوی کارشناسی مهندسی صنایع، دانشگاه اردکان، یزد.

\* نویسنده مسئول: a.saryazdi@iju.ir

پذیرش: ۲ بهمن ۱۴۰۰

بازنگری: ۱۲ دی ۱۴۰۰

دریافت: ۱۲ مرداد ۱۴۰۰

### چکیده

در عصر اقتصاد دیجیتال، میزان استفاده از وسایل الکترونیکی و به تبع آن ضایعات الکترونیکی افزایش یافته است به نحوی که ضایعات الکترونیکی سریع‌ترین رشد را در میان زباله‌ها در سطح جهان دارد. این ضایعات به‌مانند زباله‌های دیگر دارای اثر مخرب زیست‌محیطی می‌باشند؛ بنابراین کنترل ضایعات الکترونیکی و برنامه‌ریزی جهت بازیافت آن‌ها به‌عنوان یک معضل مدیریتی و محیط‌زیستی در سطح ملی و جهانی مطرح شده است. در پژوهش حاضر با به‌کارگیری رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها و با استفاده از مدل‌سازی اسنادی و بررسی پیشینه موضوع، مدل پویایی‌شناسی سیستم به‌منظور شناسایی ساختار حاکم بر ایجاد ضایعات الکترونیکی و بازیافت آن‌ها و همچنین پیش‌بینی میزان ضایعات و ظرفیت موردنیاز برای بازیافت آن‌ها طراحی شده است. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که اگرچه میزان ضایعات و بازیافت آن‌ها در حال رشد است، این رشد با محدودیت مواجهه شده است. با این حال صنایع بازیافتی سودآور در حال گسترش می‌باشند.

کلمات کلیدی: ضایعات الکترونیکی، اقتصاد دیجیتال، پیش‌بینی، رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها،

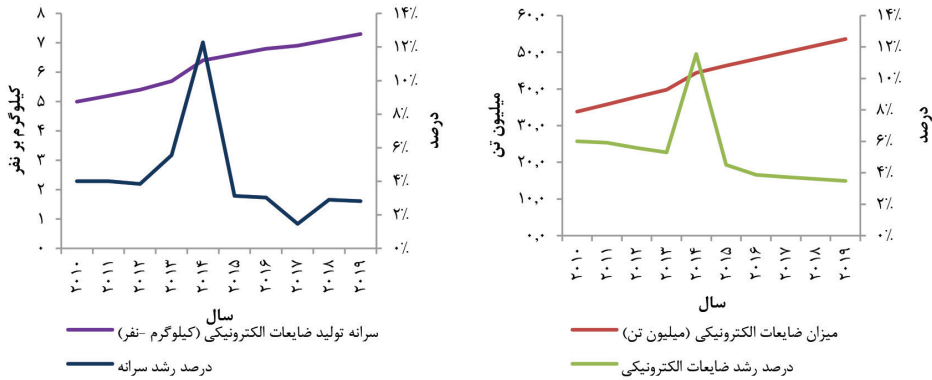
مدل‌سازی اسنادی

## مقدمه

در عصر اقتصاد دیجیتال خدمات الکترونیکی و همچنین تولید و استفاده از وسایل الکترونیکی در سطح جهان گسترش یافته‌اند و به‌فراخور کاهش طول عمر این محصولات، ضایعات آن‌ها نیز به‌صورت فزاینده‌ای در حال رشد می‌باشند (دارابی و یغمایی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲؛ خاتمی فیروزآبادی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). ضایعات الکترونیکی یا زباله الکترونیکی<sup>۳</sup> به دستگاه‌های الکترونیکی مصرف‌شده و قطعات آنان نظیر تلفن‌ها و رایانه‌ها، لوح فشرده و غیره اطلاق می‌شود که با توجه به محتویات فلزی خطرناک (نظیر سرب، کادمیوم و جیوه)، در صورت رهاسازی در طبیعت پس از پایان عمر مفید و عدم بازیافت صحیح، آلوده‌کننده محیط‌زیست به‌شمار می‌روند (بالده<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۷).

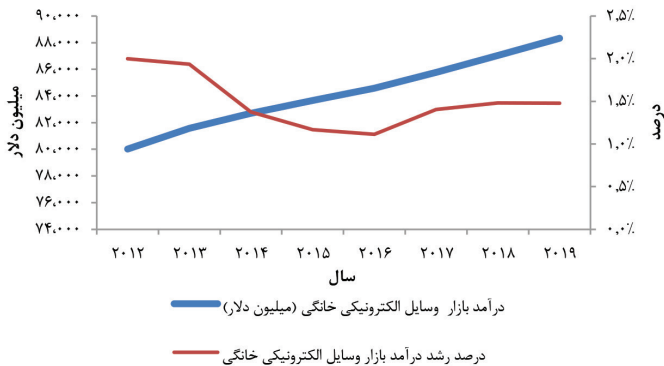
ضایعات الکترونیکی سریع‌ترین رشد زباله را در قیاس با سایر انواع ضایعات دارند (پرکینز<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). میزان پسماند الکترونیکی در سال ۲۰۱۹ حدود ۵۴ میلیون تن با ارزش حداقلی ۶۲/۵ میلیارد دلار بود. براین‌اساس سازمان ملل از عبارت «سونامی پسماندهای الکترونیکی»<sup>۶</sup> برای اشاره به سرعت فزاینده رشد و حجم بالای این ضایعات استفاده کرده است. طبق آمار، قاره آسیا سهم بالایی در تولید ضایعات الکترونیکی دارد (۴۱٪) و کشورهای چین و آمریکا بیشترین ضایعات الکترونیکی را در جهان ایجاد می‌کنند. البته ۹۳٪ از ضایعات آمریکا نیز جهت بازیافت و دفن به آسیا ارسال می‌شود به‌نحوی که هم‌اکنون ۷۰٪ رایانه‌ها و موبایل‌های جهان در چین بازیافت می‌شوند (بالده و همکاران، ۲۰۱۷). در این‌راستا میزان ضایعات الکترونیکی متوسط سالانه ۵/۳۵٪ رشد داشته است در حالی که این رشد به‌غیر از سال ۲۰۱۴، کاهنده است (شکل ۱). همچنین سرانه ضایعات الکترونیکی متوسط سالانه ۴/۳۰ درصد رشد داشته است که این رشد به‌استثنای سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴، نوسانی و کاهنده است.

- 
- 1 . Darabi & Yaghmaei
  - 2 . Khatami Firoozabadi
  - 3 . Electronic-Waste / E-Waste
  - 4 . Baldé
  - 5 . Perkins
  - 6 . Tsunami of E-Waste



شکل ۱: میزان و سرانه ضایعات الکترونیکی و درصد رشد آن در جهان (تیسو<sup>۱</sup>، ج<sup>۲</sup>، د<sup>۳</sup>)

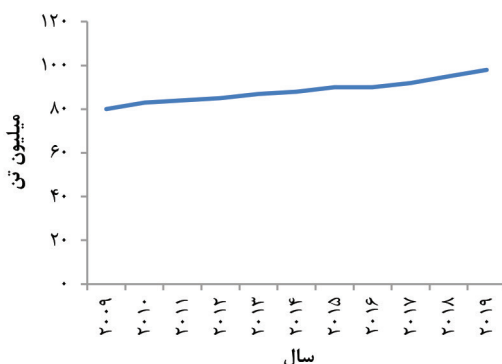
یکی از منابع تولید ضایعات الکترونیکی در جهان، ضایعات الکترونیکی ناشی از وسایل الکترونیکی خانگی است. در این راستا هر چند رشد بازار وسایل الکترونیکی مصرفی نیز به طور متوسط سالانه ۱/۵٪ رشد داشته است، این رشد نیز کاهنده بوده است (شکل ۲). از طرفی جمعیت جهان نیز به عنوان یکی از متغیرهای مؤثر بر مصرف وسایل الکترونیکی رفتاری مشابه دارد؛ به عبارت دیگر جمعیت به عنوان عامل تقاضای وسایل الکترونیکی مصرفی به طور متوسط سالانه ۱/۱۵٪ درصد رشد داشته اما این رشد نیز کاهنده است (وردومترز<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰).



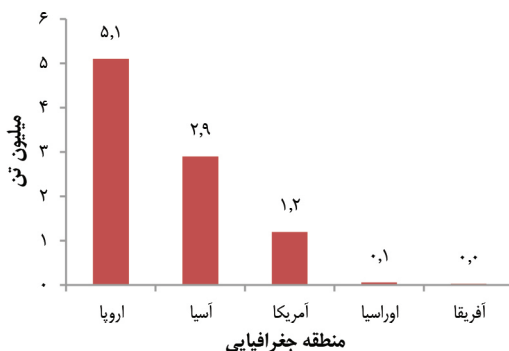
شکل ۲: درآمد بازار وسایل الکترونیکی خانگی و درصد تغییرات آن (تیسو، ج<sup>۲</sup>، د<sup>۳</sup>)

- 1 . Tiseo
- 2 . c
- 3 . d
- 4 . Worldometers
- 5 . b

تولید ضایعات به ایجاد آلودگی و تخریب محیط‌زیست منجر می‌شود؛ به‌عنوان مثال دی‌اکسید کربن تولیدشده از ضایعات الکترونیکی در سال‌های اخیر در حال رشد است (شکل ۳). یکی از روش‌های مقابله با ضایعات الکترونیکی، بازیافت آن‌ها است. در این راستا اگرچه بازیافت خود نیز فرایندی مخرب است اما بعضی از قطعات و عناصر ضایعات بسیار ارزشمند می‌باشند و درآمد فراوانی ایجاد میکنند. در این راستا در سال ۲۰۱۹ کشورهای اروپایی و آسیایی بیشترین میزان بازیافت را داشته‌اند (شکل ۴).



شکل ۳: میزان دی‌اکسید کربن تولیدی (فورتی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰)



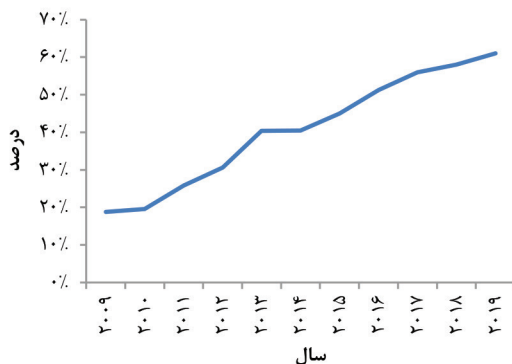
شکل ۴: میزان بازیافت ضایعات الکترونیکی در سال ۲۰۱۹ به تفکیک منطقه جغرافیایی (تیسو، ۲۰۲۰ الف<sup>۲</sup>)

با افزایش میزان ضایعات الکترونیکی، فواید و مضرات آن‌ها در محیط‌زیست بروز یافته است؛

1 . Forti

2 . a

بنابراین برای مقابله با این حجم از ضایعات و اثرات آن‌ها، فناوری در دو مسیر توسعه فناوری محصول و توسعه فناوری بازیافت توسعه یافته است (اتیجر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). در مسیر اول، توسعه فناوری محصولات الکترونیکی در راستای تولید محصولات با مواد کم‌خطر و قابل‌استفاده مجدد و بازیافت‌پذیر در دستورکار قرار گرفته است؛ به‌عنوان مثال شرکت اپل به تولید مانیتورهای بدون جیوه می‌پردازد (البلوشی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۲). در مسیر دوم، بازیافت ضایعات الکترونیکی در سطح جهان گسترش یافته است و در این راستا فناوری بازیافت در ۴ مرحله فرایند بازیافت توسعه یافته است. به‌عنوان مثال در مرحله جمع‌آوری، فناوری جداسازی ضایعات براساس نوع پردازش توسعه یافته است (پینهو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). در مرحله پیش‌پردازش نیز جداسازی قطعات براساس فناوری‌های مبتنی بر دما، خاصیت آهنربایی (جداسازی گرانشی) و غیره توسعه یافته است (وان یکن<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). در مرحله پردازش تعمیر و استفاده مجدد و نهایتاً در مرحله خردکردن و ازبین‌بردن فناوری‌های مختلفی توسعه یافته است (دایاس<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل ۵: نسبت بازیافت ضایعات الکترونیکی به ضایعات تولیدشده (تیسو، ۲۰۲۰)

بنابراین ضایعات الکترونیکی از سه دیدگاه حائز اهمیت است: (۱) رشد روزافزون تولید ضایعات الکترونیکی (شکل ۵)، (۲) ارزشمندی بازیافت ضایعات به دلیل دارا بودن مواد با ارزش نظیر طلا، نقره، آلومینیوم، آهن و مس و (۳) آلودگی زیست‌محیطی به دلیل وجود مواد بسیار خطرناک نظیر فلزات

- 1 . Ottiger
- 2 . Alblooshi
- 3 . Pinho
- 4 . Van Yken
- 5 . Dias

سنگین (نیکل، کادمیم و سرب) (پرکینز و همکاران، ۲۰۱۴؛ دارابی و یغمایی، ۲۰۱۲). اهمیت و اثرات ضایعات الکترونیکی سبب شده است که مطالعات مختلفی به بررسی این پدیده بپردازند. بعضی از مطالعات به بررسی کمی و کیفی ضایعات الکترونیکی نظیر میزان تولید، بازیافت، نحوه بازیافت و اثرات ضایعات (دارابی و یغمایی، ۲۰۱۲؛ کومار<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۷؛ بالده و همکاران، ۲۰۱۷؛ کیوهر<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹) یا پیش‌بینی روند ضایعات الکترونیکی (دیویدی و میتال<sup>۳</sup>، ۲۰۰۹؛ آراجو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۲) پرداخته‌اند. برخی نیز مضرات (نیک‌بین<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۸؛ پرکینز و همکاران، ۲۰۱۴؛ شمیم<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۵) و مزایای (هدایتی آق‌مشهدی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۴) ضایعات الکترونیکی را ذکر کرده‌اند. همچنین مطالعاتی به بررسی قوانین مرتبط و توسعه نظام‌های مدیریت ضایعات الکترونیکی پرداخته‌اند (کاهات<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ مندز-فاجاردو<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۲۰؛ شکوهیار و اکبری<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۶) و برخی دیگر به توسعه فناوری در حوزه ضایعات الکترونیکی توجه داشته‌اند (اتیجر و همکاران، ۲۰۱۹؛ البلوشی و همکاران، ۲۰۲۲؛ پینهو و همکاران، ۲۰۱۸؛ وان‌یکن و همکاران، ۲۰۲۱).

بررسی پیشینه موضوع نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات مختلفی در زمینه ضایعات الکترونیکی صورت پذیرفته است، مطالعه‌ای متمرکز بر ساختار حاکم بر تولید ضایعات و همچنین بازیافت، مصرف قطعات بازیافتی و درآمدزایی بازیافت به‌صورت یکپارچه انجام نشده است و در این زمینه خلأ نظری قابل احصا می‌باشد. از سوی دیگر سیاست‌گذاران حوزه محیط‌زیست می‌بایست ضمن پیش‌بینی روند تولید ضایعات، بازیافت و استفاده مجدد وسایل الکترونیکی، به برآورد این صنعت و سیاست‌گذاری در این زمینه جهت بهره‌مندی بهتر از مزایای آن و کاهش معایب از جمله معایب زیست‌محیطی بپردازند؛ چراکه براساس اطلاعات موجود میزان ضایعات الکترونیکی زیاد می‌باشد اما این صنعت به‌تبع روند جمعیت به‌عنوان عامل اصلی تقاضای وسایل الکترونیکی مصرفی، دارای رشدی کاهنده در سال‌های اخیر بوده است. با توجه به موارد مذکور، مدیریت مناسب برای استفاده از این ضایعات در راستای

1 . Kumar

2 . Kuehr

3 . Dwivedy &amp; Mittal

4 . Araújo

5 . Nikbeen

6 . Shamim

7 . Hedayati Aq Mashhadi

8 . Kahhat

9 . Méndez-Fajardo

10 . Shokoohyar &amp; Akbari

کنترل اثرات منفی و بهره‌مندی از فواید این صنعت ضروری است (معنوی‌زاده<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰).  
براین اساس مدل‌سازی یکپارچه زنجیره تولید تا بازیافت ضایعات الکترونیکی ضروری می‌باشد؛ بنابراین  
سؤالات پژوهش به شرح زیر است:

۱. ساختار حاکم بر تولید و بازیافت ضایعات الکترونیکی چگونه است؟
۲. با شرایط فعلی رفتار میزان ضایعات الکترونیکی در سال‌های آینده چگونه است؟
۳. تغییر الگوی مصرف چگونه بر میزان ضایعات الکترونیکی تأثیر می‌گذارد؟
۴. ظرفیت‌سازی در بازیافت چگونه بر میزان ضایعات الکترونیکی تأثیر می‌گذارد؟
۵. درآمدزایی سالانه بازیافت وسایل الکترونیکی به چه میزان است؟

در بخش‌های بعدی ابتدا پیشینه نظری مطالعات مرور شده و سپس روش پژوهش و همچنین  
رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها معرفی و تبیین شده است. در ادامه گام‌های مدل‌سازی و نتایج آن  
تشریح شده است و نهایتاً نتیجه‌گیری از بحث صورت پذیرفته است.

### پیشینه پژوهش

ضایعات و خصوصاً ضایعات الکترونیکی به دلیل آثار مختلف و شدید بر جامعه و محیط‌زیست مورد توجه  
پژوهشگران قرار گرفته است. در میان مطالعات داخلی، دارابی و یغمایی (۲۰۱۲) به بررسی ضایعات  
الکترونیکی از زوایای گوناگون نظیر میزان و ترکیب ضایعات، مراحل بازیافت، مدیریت ضایعات و  
فواید و مضرات آن‌ها پرداختند. براین اساس سهم کشور از ضایعات تولیدی در جهان ۴ میلیون تن  
(۰.۸٪) بوده است. همچنین در میان انواع ضایعات، تلفن‌های همراه سهم قابل توجهی از ضایعات کشور  
را به خود اختصاص داده‌اند چراکه به‌عنوان مثال ایرانی‌ها هر ۱۵ ماه یک‌بار و اروپایی‌ها هر ۱۸ ماه  
یک‌بار گوشی خود را عوض می‌کنند. هدایتی‌آق‌مشهدی و همکاران (۲۰۱۴) برای سال ۱۴۰۲ میزان  
ضایعات الکترونیکی در منطقه ۶ تهران و ارزش فلزات را به ترتیب ۱۱۴۵ تن و ۸۵۰۰۰۰ دلار  
برآورد کردند؛ البته این برآورد به صورت مقطعی و بدون در نظر گرفتن زنجیره یکپارچه تولید تا بازیافت  
ضایعات الکترونیکی انجام شده است. شکوهیار و اکبری (۲۰۱۶) با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی،  
زیست‌محیطی و اجتماعی و بدون توجه به میزان کنونی و پیش‌بینی ضایعات، مدلی برای تعیین بهترین  
مکان تأسیس کارخانه‌های بازیافت برای مدیریت کلی ضایعات الکترونیکی در کشور طراحی کردند.



در میان مطالعات خارجی، آراجو و همکاران (۲۰۱۲) بر فقدان مدل‌های قابل اعتماد برای پیش‌بینی مقادیر زباله تولیدشده تأکید کردند. ایشان در ادامه براساس اطلاعات محدود به پیش‌بینی روند تولید ضایعات الکترونیکی در هند و برزیل پرداخته‌اند. براین‌اساس مهم‌ترین متغیر برای تخمین مصرف و پیش‌بینی ضایعات، طول عمر تجهیزات است و از آنجایی که برزیل بازاری شدیداً در حال گسترش است، تولید زباله الکترونیکی کماکان روندی روبه‌رشد دارد. این پژوهشگران در پایان پیشنهاد دادند که با جمع‌آوری داده‌های کامل‌تر و مدل مناسب و جامع، امکان تخمین قابل‌اعتمادتر از تولید زباله و ارائه تفسیری روشن‌تر از سیاست‌گذاری در این زمینه فراهم شود. پرکینز و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که هر چند بازیافت ضایعات فواید زیادی دارد اما مضرات و آلودگی‌های بازیافت غیرقانونی و نادرست - که حجم فراوانی (حدود ۷۵٪) را نیز به خود اختصاص داده است - از مزایای آن بیشتر است. شمیم و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی ارتباط میان بازیافت نادرست ضایعات الکترونیکی و پیامدهای آن بر سلامت کارگران در کشورهای در حال توسعه پرداختند و برنامه‌هایی برای جمع‌آوری و بازیافت صحیح ضایعات الکترونیکی از طریق قانون‌گذاری صحیح پیشنهاد کردند. کومار و همکاران (۲۰۱۷) به مرور آمار جهانی تولید ضایعات الکترونیکی و فروش وسایل الکترونیکی جدید پرداختند و براین‌اساس دریافتند که این ضایعات سالانه رشدی ۳ تا ۵ درصدی داشته و بین میزان ضایعات تولیدی و تولید ناخالص داخلی کشورها نیز همبستگی وجود دارد. بالده و همکاران (۲۰۱۷) ضمن بررسی آمارهای ضایعات الکترونیکی در جهان بیان داشتند که تنها حدود ۲۰ درصد ضایعات الکترونیکی در سال ۲۰۱۶ با روش‌های صحیح بازیافت می‌شوند. کیوهر (۲۰۱۹) بر رشد نمایی ضایعات الکترونیکی با توجه به افزایش تولید وسایل الکترونیکی و به تبع آن ضایعات الکترونیکی به‌فراخور افزایش تقاضا ناشی از الکترونیکی شدن فعالیت‌ها، تغییرات فناوری و تعویض سریع وسایل مورد استفاده تأکید کردند. گارنیری<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۰) به طبقه‌بندی چالش‌های مالی - اقتصادی، زیست‌محیطی، بازاری، قانونی، مدیریتی و سیاست‌گذاری، دانشی و فناورانه بازیافت ضایعات الکترونیکی پرداختند. از سوی دیگر مطالعات مختلف از نظر توسعه فناوری در حوزه ضایعات الکترونیکی به دو مسیر توسعه فناوری وسایل الکترونیکی با تولید محصولات دارای مواد کم‌خطر و قابل استفاده مجدد و بازیافت‌پذیر (البلوشی و همکاران، ۲۰۲۲) و توسعه فناوری بازیافت در مراحل فرایند بازیافت (جمع‌آوری، پیش‌پردازش، پردازش و امحاء) (پینهو و همکاران، ۲۰۱۸؛ وان‌یکن و همکاران، ۲۰۲۱؛ دیاس و همکاران، ۲۰۱۸) اشاره کردند.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که هر چند در زمینه ضایعات الکترونیکی مطالعات مختلفی صورت پذیرفته است، تمرکز بیشتر آنها بر تبیین آثار مثبت و منفی ضایعات و ارائه سیاست‌هایی جهت مدیریت آنها می‌باشد. تنها مطالعات محدودی به پیش‌بینی مقدار ضایعات پرداخته‌اند که این مطالعات نیز به صورت مقطعی، با در نظر گرفتن عواملی محدود نظیر طول عمر تجهیزات الکترونیکی و بدون توجه به زنجیره تولید ضایعات الکترونیکی انجام شده است. به بیان دیگر به بررسی یکپارچه ساختار حاکم بر تولید ضایعات و همچنین بازیافت، مصرف قطعات بازیافتی و درآمدزایی بازیافت پرداخته نشده است؛ بنابراین طراحی مدل یکپارچه زنجیره ضایعات الکترونیکی به منظور پیش‌بینی روند ضایعات الکترونیکی و بررسی پیامدهای سیاست‌گذاری در قالب سناریوهای گوناگون ضروری می‌باشد.

### روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر ماهیت، توصیفی-پیمایشی و از نظر هدف، کاربردی است چراکه به دنبال شناخت و حل یک مسئله واقعی می‌باشد. از نظر قلمروی زمانی پژوهش، اطلاعات سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ مبنای تعریف مسئله و تدوین مدل و معادلات قرار گرفته است تا بر اساس ساختار به دست آمده رفتار مدل در ۱۰ سال آتی (تا سال ۲۰۳۰) پیش‌بینی شود. قلمروی مکانی پژوهش، ضایعات الکترونیکی سراسر جهان است و قلمروی موضوعی نیز ضایعات الکترونیکی مصرفی (خانگی و فردی) را شامل می‌شود. از نظر روش مدل‌سازی، پژوهش حاضر از روش مدل‌سازی اسنادی<sup>۱</sup> بهره گرفته است. مدل‌سازی اسنادی به استفاده از منابع و اسناد مکتوب به عنوان منبع اصلی در مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها اشاره دارد که شامل پایگاه اطلاعاتی مکتوب و عددی می‌باشند (فارستر<sup>۲</sup>، ۱۹۸۰). در این روش مدل‌سازی پس از جستجو و شناخت منابع مرتبط با مسئله، به بررسی مستندات و تحلیل آنها به منظور استخراج دانش برای مدل‌سازی مبتنی بر دیدگاه سیستمی می‌پردازد (حاجی غلام سریزدی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۱)؛ بنابراین پژوهش حاضر از نظر روش گردآوری اطلاعات، مطالعه‌ای کتابخانه‌ای است. در تعریف مسئله و تدوین مدل از پایگاه‌های داده مکتوب نظیر استاتیسیتا<sup>۴</sup> و وردومترز و برای طراحی مدل از مرور پیشینه و شناخت سیستم توسط مدل‌سازی استفاده شده است.

رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی در حوزه‌های مختلف صنعتی و

- 1 . Document Model Building (DMB)
- 2 . Forrester
- 3 . Haji Gholam Saryazdi
- 4 . Statista

اقتصادی-اجتماعی نظیر تدوین راهبرد (علی محمدی اصل<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰) و درک ساختارهای حاکم بر مسئله (دهقان و رضانی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹) مورد استفاده قرار گرفته است. این رویکرد برای پیش‌بینی و تحلیل اثر سیاست‌های مختلف و ارزیابی آن‌ها طی زمان مناسب است (کمالی سراجی و مروتی شریف‌آبادی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۷؛ حاجی غلام سریزدی و سهرابی<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰) و زمینه‌ساز اصلاح مدل ذهنی مدیران و تعهد در اجرای بهتر سیاست‌ها می‌شود. ازسوی دیگر این رویکرد نسبت به سایر روش‌ها (نظیر روش‌های ریاضی) برای شناخت ساختار حاکم بر پدیده مورد مطالعه به منظور پیش‌بینی با هدف تغییر مدل ذهنی و فهم دقیق نسبت به پدیده، به فراخور عدم حذف ساختارهای جزئی مناسب است (باربر و لوپز-والکارسل<sup>۵</sup>، ۲۰۲۰). پنج گام ساختاردهی به مسئله (تعریف مسئله با تعیین مرز مدل)، توسعه فرضیه پویا، مدل‌سازی و فرمول‌بندی (تدوین مدل علت و معلولی و نمودار جریان)، اعتبارسنجی مدل و شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل نتایج (سناریوسازی و ارزیابی سیاست‌ها) برای مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها ارائه شده است (استرمن<sup>۶</sup>، ۲۰۰۰). گام‌های پژوهش براساس گام‌های مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها و روش مدل‌سازی اسنادی طراحی شده‌اند (جدول ۱).

### جدول ۱: فرایند پژوهش

ردیف	گام مدل‌سازی	منابع مدل‌سازی	خروجی‌های مدل‌سازی
۱	تعریف مسئله و تدوین فرضیه پویا	بررسی اطلاعات عددی و داده‌های کمی، بررسی کلی مقالات	نمودارهای رفتار طی زمان و تعریف مسئله، فرضیه پویا با رسم نمودار زیرسیستم و جدول مرز مدل
۲	ساخت مدل علت و معلولی	بررسی دقیق پیشینه موضوع با مدل‌سازی اسنادی	شناسایی متغیرها، شناسایی حلقه‌های رشد (مثبت) و تعادلی (منفی)
۳	ترسیم نمودار جریان	بررسی دقیق پیشینه موضوع و داده‌های کمی	تبدیل مدل علت و معلولی به مدل جریان با شناسایی متغیرهای حالت، نرخ و کمکی، فرمول‌بندی متغیرها و تعیین مقادیر عامل‌ها

1 . Alimohammadi Asl

2 . Dehghan & Ramezani

3 . Kamali Saraji & Morovati Sharifabadi

4 . Haji Gholam Saryazdi & Sohrabi

5 . Barber & López-Valcárcel

6 . Sterman

ردیف	گام مدل سازی	منابع مدل سازی	خروجی های مدل سازی
۴	اعتبارسنجی و شبیه سازی مدل	مقایسه با داده های کمی	آزمون مدل و اعتبارسنجی و اصلاح مدل، شناسایی سناریوها و سیاست ها، اعمال در مدل و تحلیل نتایج

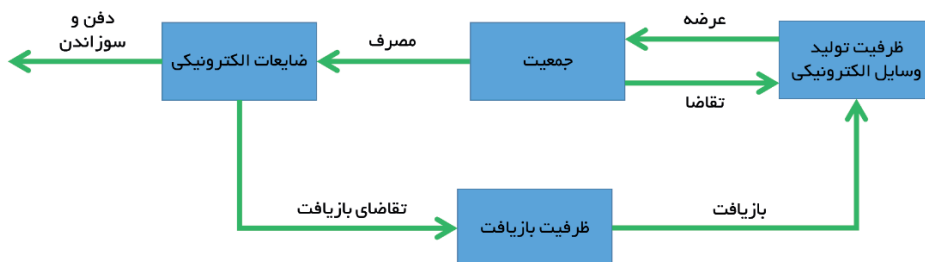
### یافته های پژوهش

یافته های پژوهش حاضر در قالب گام های مدل سازی پویایی شناسی سیستم ها (تعریف مسئله و تدوین فرضیه پویا، ترسیم نمودار علت و معلولی، تدوین مدل جریان، اعتبارسنجی مدل و شبیه سازی) در ادامه ارائه شده است.

### تعریف مسئله و تدوین فرضیه پویا

تعریف مسئله در پویایی شناسی سیستم ها با رسم نمودارهای رفتار طی زمان (مدل مرجع) متغیرهای نشان دهنده مسئله صورت می پذیرد. همان گونه که از شکل های (۱) تا (۵) مشخص شد، میزان ضایعات الکترونیکی و به تبع آن فواید و مضرات آن در حال افزایش است؛ براین اساس پژوهش حاضر درصدد بررسی ساختار حاکم بر جریان ضایعات الکترونیکی از تولید تا بازیافت و استفاده مجدد از وسایل الکترونیکی می باشد.

در این گام، برای تدوین فرضیه پویای نظریه اولیه در خصوص علل ایجاد مسئله و ساخت مدل از مدل سازی اسنادی (مرور پیشینه) و دیدگاه مدل ساز جهت تدوین فرضیه و ساخت مدل استفاده شد (استرمن، ۲۰۰۰؛ حاجی غلام سریزدی، ۲۰۱۸). شکل (۶) تصویری غنی از زیرسیستم های مسئله ارائه می نماید.

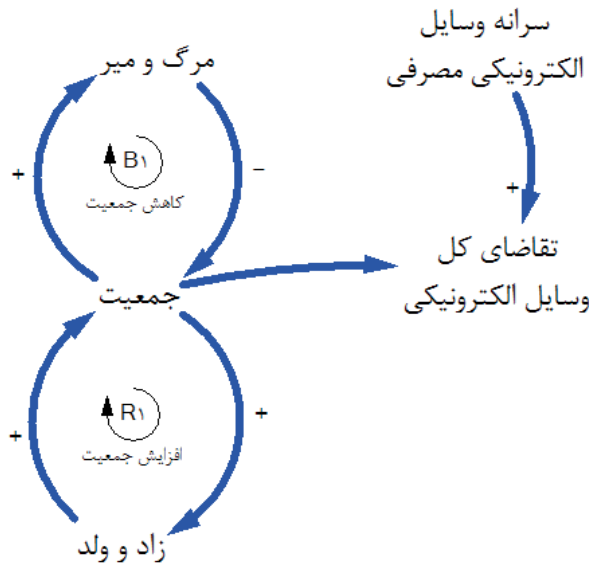


شکل ۶: تصویر غنی از زیرسیستم های مسئله

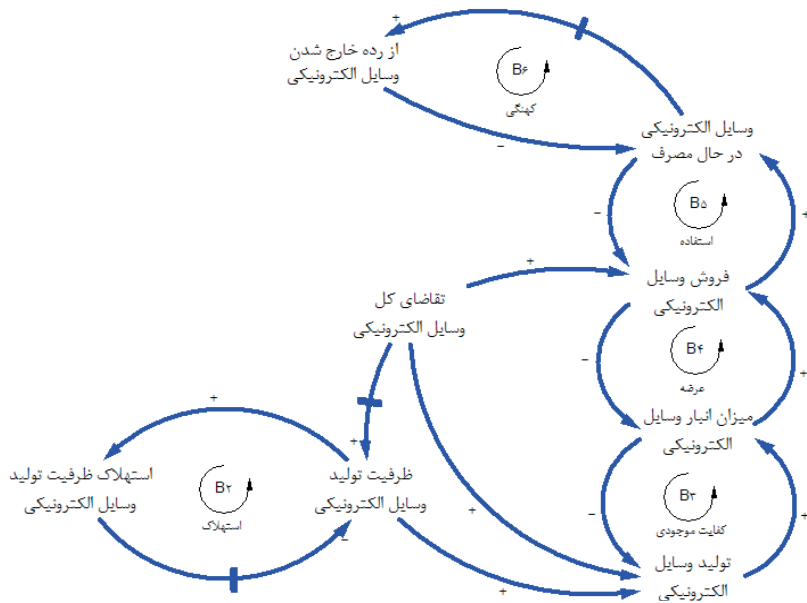
باتوجه به نمودار زیرسیستم می‌توان فرضیه پویا را این‌گونه بیان کرد که تقاضای وسایل الکترونیکی مصرفی (فردی و خانگی) تابعی از جمعیت است؛ بنابراین با افزایش جمعیت، تولید وسایل الکترونیکی نیز افزایش می‌یابد. با تولید و فروش وسایل الکترونیکی، استفاده از آن‌ها بیشتر می‌شود و هرچقدر وسایل الکترونیکی در حال مصرف باشد، فروش کاهش می‌یابد. هرچقدر وسایل الکترونیکی استفاده شوند، این وسایل از رده خارج می‌شوند و به ضایعات تبدیل می‌شوند. این روند، فروش بیشتر را نیز به دنبال دارد. ضایعات الکترونیکی دفن می‌شوند و یا بازیافت، به چرخه تولید وسایل الکترونیکی بازمی‌گردند.

### ترسیم مدل علت و معلولی

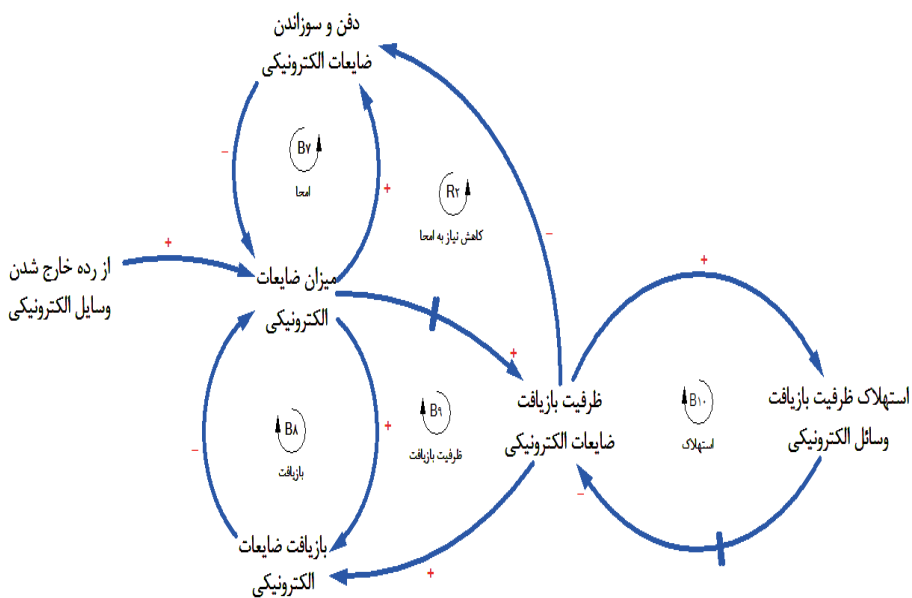
باتوجه به نمودار زیرسیستم‌ها و فرضیه پویا، مدل علت و معلولی مسئله با ۲ حلقه تقویتی (مثبت) و ۱۰ حلقه تعادلی (منفی) ترسیم شده است (شکل ۷).



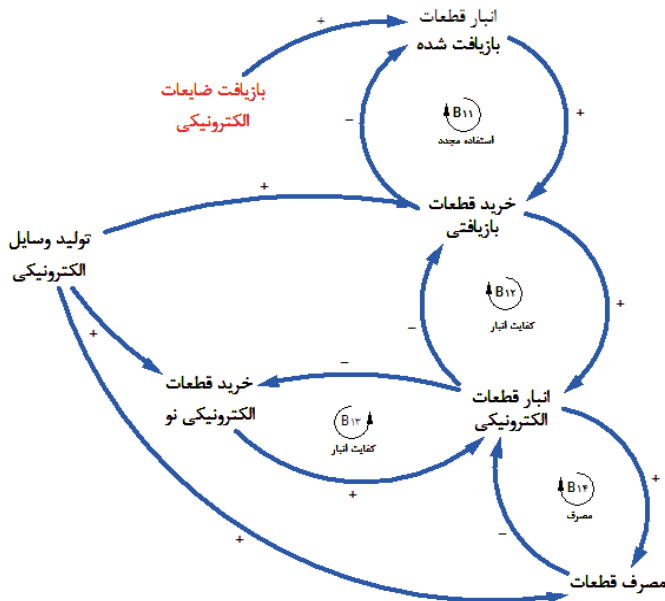
(الف)



(ب)



(ج)



(۵)

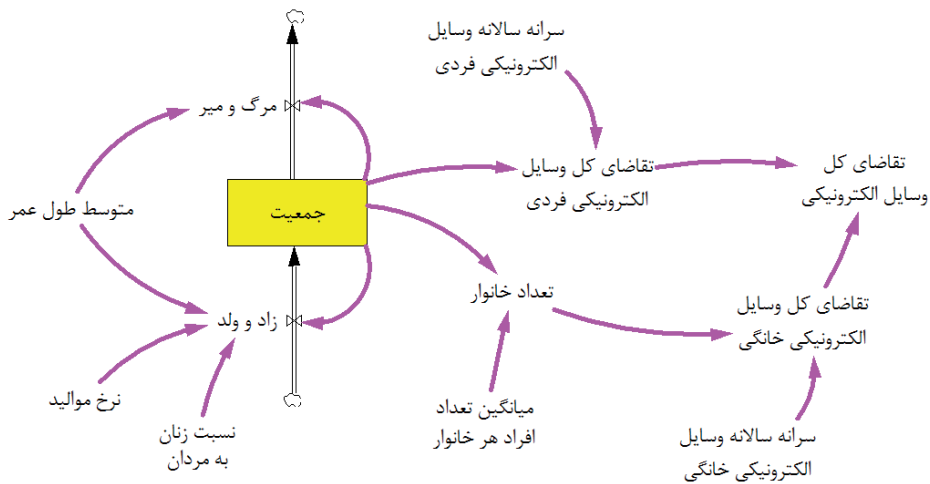
شکل ۷: نمودارهای علت و معلولی مسئله

نمودار (الف) ساختار حاکم بر تقاضای وسایل الکترونیکی خانگی را نشان می‌دهد که تابع جمعیت و سرانه مصرف وسایل الکترونیکی در خانوار است. جمعیت را حلقه تقویتی زادوولد و حلقه تعادلی مرگ‌ومیر تغییر می‌دهد. نمودار (ب) ساختار حاکم بر تولید، فروش و مصرف وسایل الکترونیکی را نشان می‌دهد که تولید وسایل الکترونیکی تابع تقاضا و ظرفیت تولید است و حلقه‌های کفایت موجودی، استهلاک، عرضه، استفاده و از رده خارج شدن وسایل الکترونیکی آن را تغییر می‌دهد. نمودار (ج) ساختار حاکم بر ضایعات الکترونیکی و بازیافت آن‌ها را نشان می‌دهد که تابع از رده خارج شدن وسایل الکترونیکی، بازیافت و امحاء است و بازیافت نیز خود تابع ظرفیت بازیافت و میزان ضایعات (تقاضا) می‌باشد. در نهایت نمودار (د) ساختار حاکم بر استفاده مجدد از قطعات و وسایل الکترونیکی بازیافتی را نشان می‌دهد که تابع میزان بازیافت (عرضه وسایل بازیافتی)، تولید وسایل الکترونیکی (تقاضا)، فروش و مصرف وسایل بازیافتی است.

### تدوین مدل جریان

در این گام نمودار علت و معلولی به مدل جریان تبدیل می‌شود و معادلات و مقادیر پارامترها (مدل

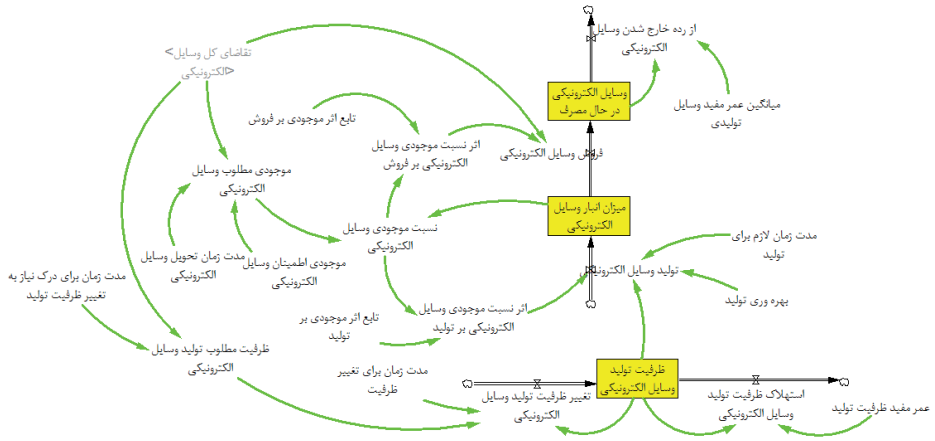
ریاضی) تعیین می‌شود. مدل جریان از ۴ بخش تشکیل شده است که در ادامه تشریح می‌شود. شکل (۸) ساختار جریان تقاضای وسایل الکترونیکی را نشان می‌دهد. براین اساس تقاضای وسایل الکترونیکی فردی و خانگی تابع جمعیت و تعداد خانوار است. جمعیت تابعی از مرگ و میر و زاد و تولد می‌باشد و خانوار نیز تابعی از میانگین افراد هر خانوار و جمعیت است.



شکل ۸: نمودار جریان تقاضای وسایل الکترونیکی

شکل (۹) ساختار جریان تولید و فروش وسایل الکترونیکی را نشان می‌دهد. براین اساس تقاضای وسایل الکترونیکی در بلندمدت، میزان ظرفیت لازم جهت تولید و عرضه وسایل الکترونیکی را تعیین می‌کند. ظرفیت تولید و تقاضای سالانه وسایل الکترونیکی نیز میزان تولید و فروش سالانه وسایل الکترونیکی را مشخص می‌کند.

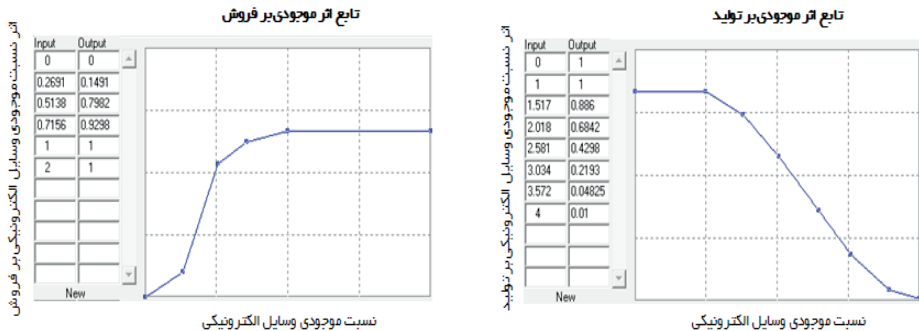




شکل ۹: نمودار جریان تولید و فروش وسایل الکترونیکی

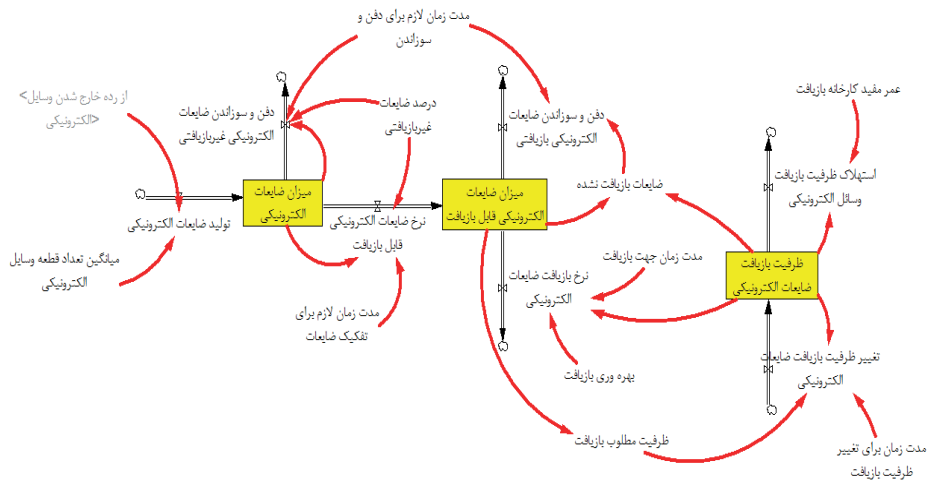
معادلات اصلی مربوط به این قسمت به شرح زیر است:

۱. تولید وسایل الکترونیکی = ظرفیت تولید وسایل الکترونیکی × بهره‌وری تولید × اثر نسبت موجودی وسایل الکترونیکی بر تولید ÷ مدت‌زمان لازم برای تولید (واحد: وسیله در سال)
۲. فروش وسایل الکترونیکی = تقاضای کل وسایل الکترونیکی × اثر نسبت موجودی وسایل الکترونیکی بر فروش (واحد: وسیله در سال)
۳. تابع جدولی اثر نسبت موجودی وسایل الکترونیکی بر تولید و بر فروش طبق شکل (۱۰)



شکل ۱۰: تابع اثر موجودی وسایل الکترونیکی بر تولید و فروش

شکل (۱۱) ساختار جریان تولید و بازیافت ضایعات الکترونیکی را نشان می‌دهد. بر این اساس وسایل الکترونیکی از رده خارج، بیانگر میزان ضایعات الکترونیکی می‌باشند که این ضایعات پس از تفکیک یا قابل بازیافت هستند و یا می‌بایست دفن و سوزانده شوند. میزان ضایعات الکترونیکی قابل بازیافت در بلندمدت، میزان ظرفیت لازم جهت بازیافت را تعیین می‌کند. ظرفیت بازیافت و میزان ضایعات الکترونیکی قابل بازیافت در سال نیز میزان بازیافت سالانه وسایل الکترونیکی را مشخص می‌کند.



شکل ۱۱: نمودار جریان تولید و بازیافت ضایعات الکترونیکی

معادلات اصلی مربوط به این قسمت به شرح زیر است:

۱. نرخ ضایعات الکترونیکی قابل بازیافت = میزان ضایعات الکترونیکی × (۱ - درصد ضایعات

غیربازیافتی) ÷ مدت زمان لازم برای تفکیک ضایعات (واحد: قطعه در سال)

۲. نرخ بازیافت ضایعات الکترونیکی = ظرفیت بازیافت ضایعات الکترونیکی × بهره‌وری بازیافت ÷

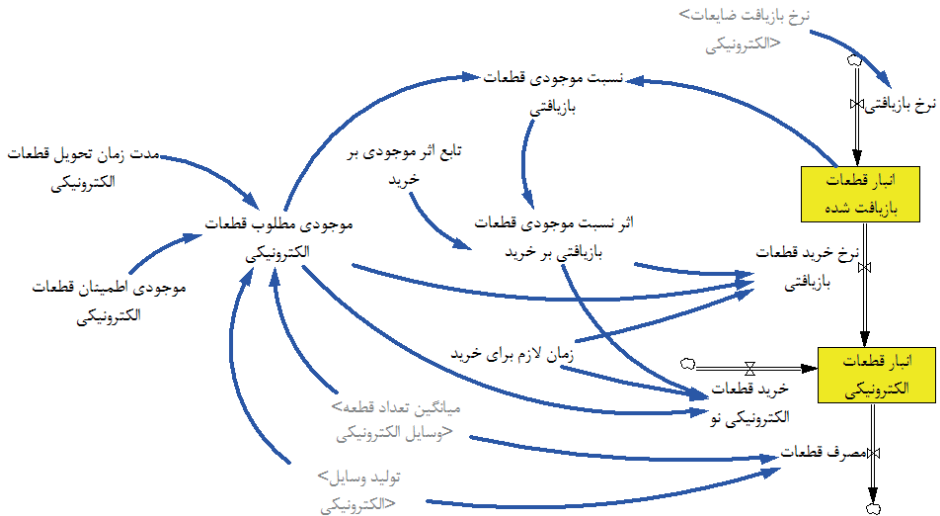
مدت زمان جهت بازیافت (واحد: قطعه در سال)

۳. ظرفیت مطلوب بازیافت = میزان ضایعات الکترونیکی قابل بازیافت (واحد: قطعه)

شکل (۱۲) ساختار جریان استفاده از وسایل الکترونیکی بازیافتی را نشان می‌دهد. ضایعات

بازیافت‌شده بر اساس میزان تقاضای وسایل الکترونیکی و موجودی وسایل بازیافتی و وسایل نو به

چرخه استفاده بازمی‌گردند.

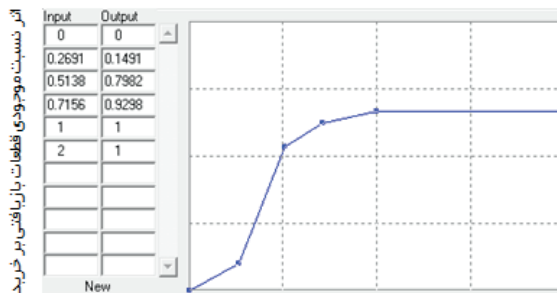


شکل ۱۲: نمودار جریان استفاده از وسایل الکترونیکی بازیافتی

معادلات اصلی مربوط به این بخش به شرح زیر است:

۱.  $\text{نرخ خرید قطعات بازیافتی} = \text{موجودی مطلوب قطعات الکترونیکی} \times \text{اثر نسبت موجودی قطعات بازیافتی بر خرید}$  (واحد: قطعه در سال)
۲.  $\text{موجودی مطلوب قطعات الکترونیکی} = \text{تولید وسایل الکترونیکی} \times \text{میانگین تعداد قطعه وسایل الکترونیکی}$  (واحد: قطعه)
۳.  $\text{تابع جدولی اثر نسبت موجودی قطعات الکترونیکی بازیافتی بر خرید قطعات نو} = \text{مدت زمان تحویل قطعات الکترونیکی} \times \text{موجودی اطمینان قطعات الکترونیکی}$  (واحد: قطعه)

تابع اثر موجودی بر خرید



نسبت موجودی قطعات بازیافتی

شکل ۱۳: تابع اثر نسبت موجودی قطعات الکترونیکی بازیافتی بر خرید قطعات نو

## اعتبارسنجی مدل

پس از توسعه مدل جریان، مدل می‌بایست از نقطه‌نظر بازنمایش و بازتولید واقعیت، آزمون و اعتبارسنجی<sup>۱</sup> شود (فارستر و سنگه<sup>۲</sup>، ۱۹۸۰). برای اعتبارسنجی در رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها از روش‌های مختلفی نظیر آزمون ساختار<sup>۳</sup> و آزمون رفتار مدل<sup>۴</sup> استفاده می‌شود (حاجی غلام سربزیدی و همکاران، ۲۰۱۳). براین اساس برای آزمون ساختار، دو آزمون تأیید ساختار و آزمون سازگاری ابعادی مورد استفاده قرار گرفت. در آزمون تأیید ساختار، مدل نرم‌افزار با به‌کارگیری آزمون مدل<sup>۵</sup> از لحاظ ساختاری تأیید شد. همچنین برای آزمون سازگاری ابعادی<sup>۶</sup> - که به بررسی معادلات و به‌کارگیری تحلیل‌های رایج نرم‌افزارهای پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای اطمینان از سازگاری واحدهای متغیرهای مدل با معادلات می‌پردازد - از گزینه آزمون واحد<sup>۷</sup> استفاده شد و براین اساس پس از اصلاح واحد چند متغیر، مدل آزمون و تأیید شد.

برای آزمون رفتار مدل از آزمون خطای بارلاس<sup>۸</sup>، آزمون شرایط حدی<sup>۹</sup>، آزمون حساسیت رفتار (تحلیل حساسیت)<sup>۱۰</sup> و بازتولید رفتار<sup>۱۱</sup> استفاده شد. در آزمون خطای بارلاس، نرخ خطا براساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود و اگر مقدار خطا از ۵٪ کمتر باشد مدل معتبر است. متغیر S مقادیر شبیه‌سازی شده و متغیر A مقادیر واقعی می‌باشد. براین اساس مقدار خطای بارلاس برای متغیر جمعیت برابر ۱/۵۵٪ است که مبین اعتبار رفتار مدل می‌باشد.

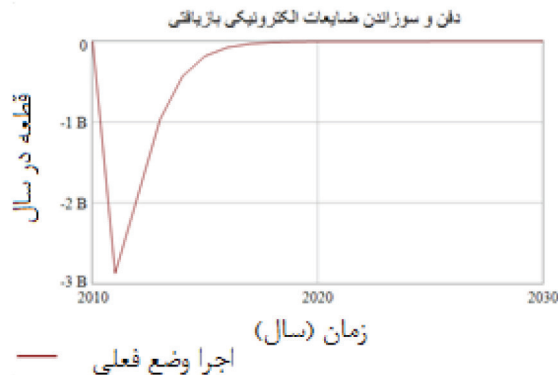
$$Error\_rate = \frac{|\bar{S} - \bar{A}|}{\bar{A}}, \bar{S} = \frac{\sum S_i}{n}, \bar{A} = \frac{\sum A_i}{n} \quad (1)$$

در آزمون شرایط حدی، رفتار مدل در حالتی بررسی می‌شود که بعضی از مؤلفه‌ها یا مقادیر اولیه

- 
- 1 . Validation
  - 2 . Forrester & Senge
  - 3 . Tests of Model Structure
  - 4 . Tests of Model Behavior
  - 5 . Check Model
  - 6 . Dimensional Consistency
  - 7 . Unit Check
  - 8 . Barlas
  - 9 . Extreme Condition Test
  - 10 . Behavior-Sensitivity Test
  - 11 . Reproduction Behavior Test

متغیرهای حالت، در وضعیت حدی قرار دارند. براین اساس اگر رفتار مدل منطقی باشد، مدل مورد تأیید است (استرمن، ۲۰۰۰). به‌عنوان مثال با صفر کردن دو متغیر سرانه سالانه وسایل الکترونیکی فردی و خانگی، تقاضا برای وسایل الکترونیکی و در نتیجه تولید وسایل الکترونیکی و خرید قطعات الکترونیکی بازیافتی نیز صفر شدند.

همچنین اگر متغیر درصد ضایعات غیربازیافتی برابر ۱ شود، از آنجاکه ضایعات برای بازیافت وجود ندارد نرخ بازیافت ضایعات، میزان دفن و میزان سوزاندن ضایعات الکترونیکی بازیافتی نیز می‌بایست صفر شود. با این حال رفتار متغیر دفن و سوزاندن ضایعات الکترونیکی بازیافتی طبق شکل (۱۴) صحیح نبود؛ بنابراین ساختار جریان تولید و بازیافت ضایعات الکترونیکی می‌بایست اصلاح شود.

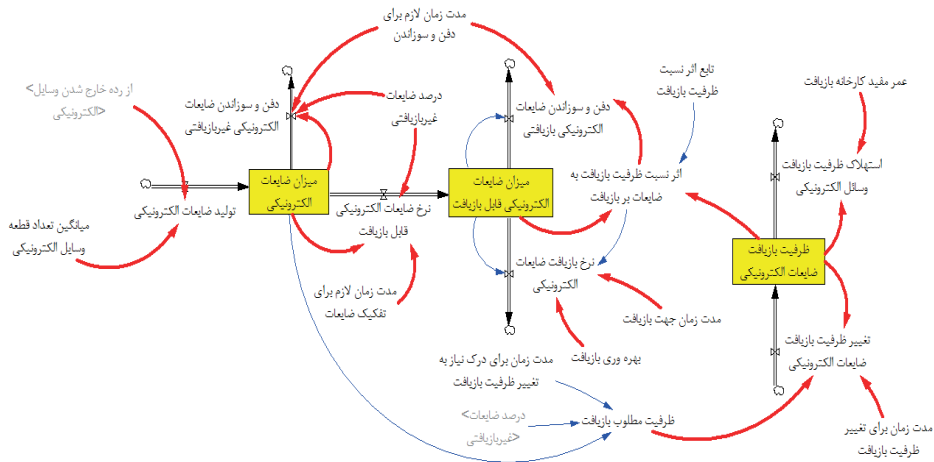


شکل ۱۴: آزمون شرایط حدی در درصد ضایعات غیربازیافتی

شکل (۱۵) مدل اصلاح‌شده را با درج تغییرات با خطوط آبی نشان می‌دهد. معادلات این بخش به شرح زیر اصلاح شدند.

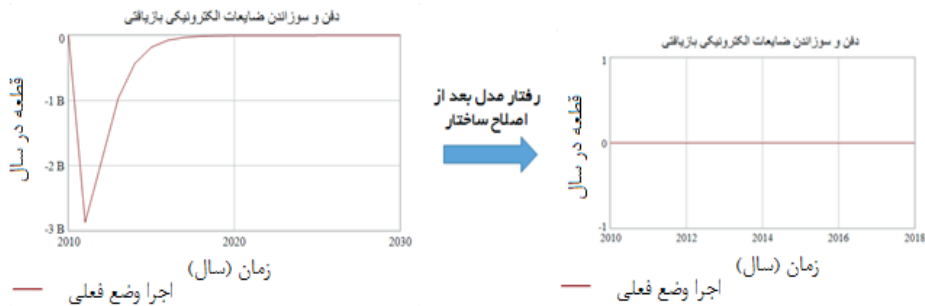
۱. نرخ بازیافت ضایعات الکترونیکی = میزان ضایعات الکترونیکی قابل بازیافت × اثر نسبت ظرفیت بازیافت به ضایعات بر بازیافت × بهره‌وری بازیافت ÷ مدت‌زمان جهت بازیافت (واحد: قطعه در سال)

۲. ظرفیت مطلوب بازیافت = تابع هموارسازی<sup>۱</sup> (۱ - درصد ضایعات غیربازیافتی) × میزان ضایعات الکترونیکی، مدت‌زمان برای درک نیاز به تغییر ظرفیت بازیافت (واحد: قطعه)



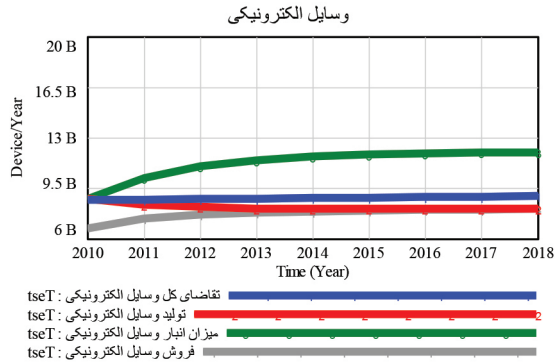
### شکل ۱۵: نمودار جریان اصلاح شده تولید و بازیافت ضایعات الکترونیکی

براساس رفتار مدل در شرایط حدی پس از اصلاح (شکل ۱۶)، اعتبار مدل تأیید شد.



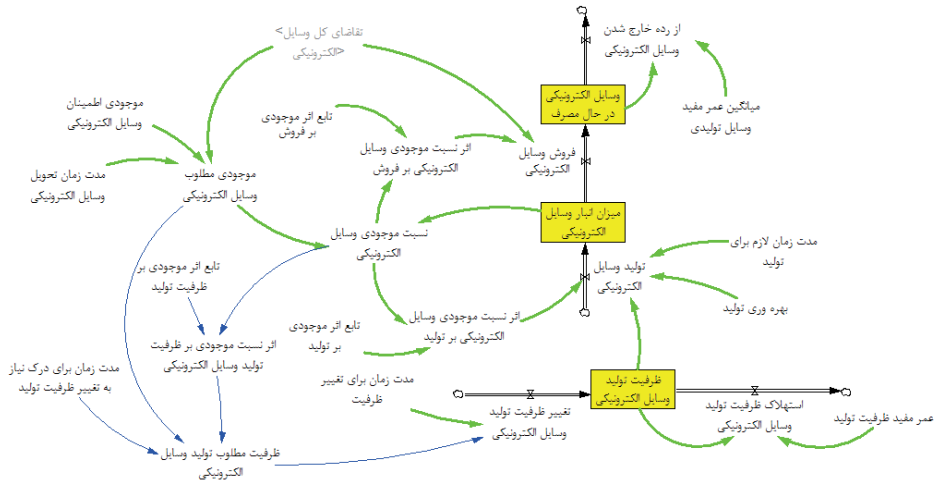
### شکل ۱۶: رفتار اصلاح شده مدل پس از تغییر مدل

در آزمون بازتولید رفتار، مدل می‌بایست رفتار مدل مرجع را بازتولید کند (استرمن، ۲۰۰۰). با بررسی رفتار متغیرهای وسایل الکترونیکی (شکل ۱۷) علی‌رغم وجود تقاضا، تولید کم شده و ازسوی دیگر فروش کمتر از تولید و تقاضا شد. براین اساس موجودی افزایش یافته و از تقاضا نیز بیشتر شد که این رفتار غیرمنطقی بوده و مبین ضرورت اصلاح ساختار جریان تولید و فروش وسایل الکترونیکی می‌باشد.



شکل ۱۷: آزمون بازتولید رفتار

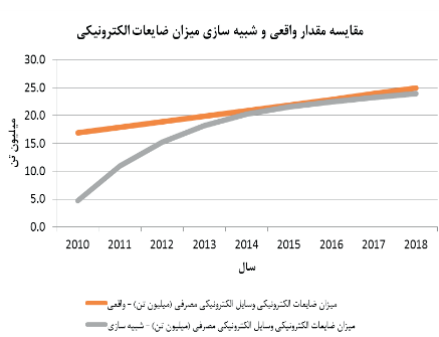
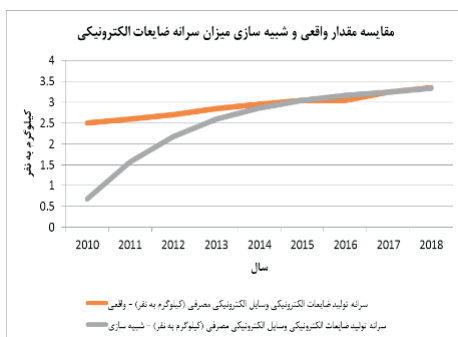
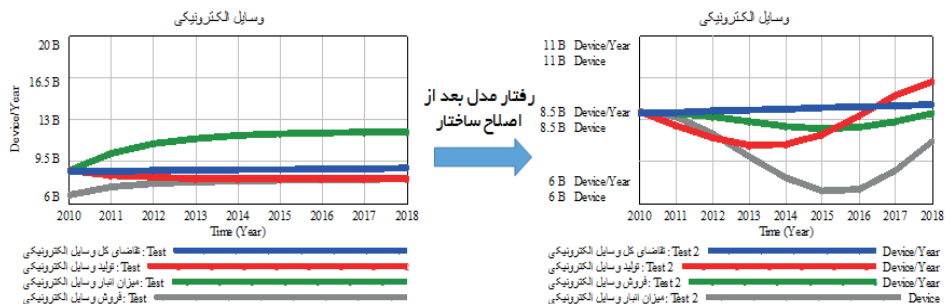
شکل (۱۸) مدل اصلاح‌شده را با درج تغییرات با خطوط آبی نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: نمودار جریان اصلاح‌شده تولید و فروش وسایل الکترونیکی

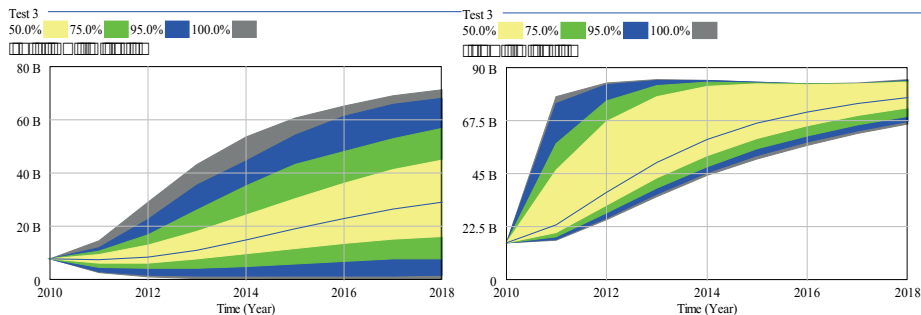
شکل (۱۹) رفتار مدل پس از اصلاح را نشان می‌دهد که مشابه رفتار واقعی بوده و در نتیجه مدل

معتبر می‌باشد.



شکل ۱۹: رفتار اصلاح شده مدل بعد از تغییر مدل و آزمون باز تولید رفتار

در آزمون تحلیل حساسیت، مدل در برابر تغییر مقادیر عددی و رفتاری مورد بررسی قرار می گیرد و نباید حساسیت غیرمنطقی در برابر تغییرات اندک داشته باشد (استرمن، ۲۰۰۰). در این آزمون، متغیر میانگین عمر مفید وسایل تولیدی از ۱ تا ۵ و متغیر درصد ضایعات غیربازیافتی از ۰ تا ۱ تغییر یافت؛ براین اساس طبق شکل (۲۰)، حساسیت رفتار مدل به تغییرات اعمال شده منطقی بود.



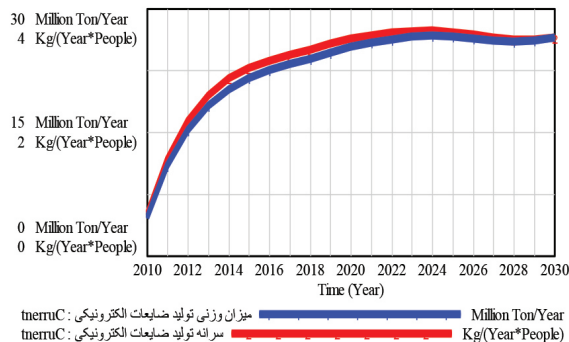
شکل ۲۰: تحلیل حساسیت مدل



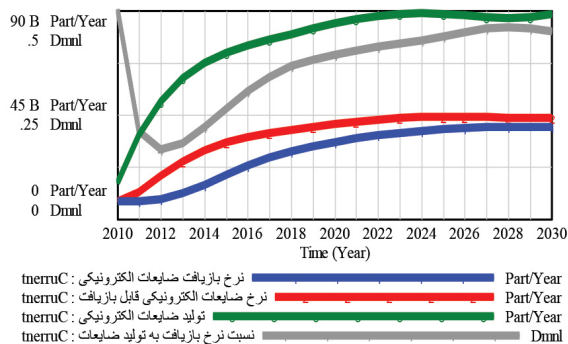
## شبیه‌سازی مدل

در این بخش ابتدا رفتار مدل در حالت پایه به منظور تجزیه و تحلیل وضع موجود بررسی شد. بازه زمانی شبیه‌سازی از گذشته تا اکنون (به مدت ۱۰ سال از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰) و آینده (به مدت ۱۰ سال تا سال ۲۰۳۰) بود. سپس رفتار مدل براساس گزینه‌های مختلف سیاستی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی رفتار مدل در حالت پایه در راستای پاسخ به سؤال (۲) بود. شکل (۲۱) در حالت پایه نشان می‌دهد که میزان تولید ضایعات الکترونیکی از وسایل الکترونیکی مصرفی ابتدا رشد فراوانی دارد اما در ادامه این رشد متوقف می‌شود. برای این اساس میزان تولید ضایعات با روندی S-شکل<sup>۱</sup> به حدود ۳۰ میلیون تن از سال ۲۰۲۰ به بعد می‌رسد. همچنین نسبت بازیافت به تولید ضایعات به فراخور رشد بیشتر ضایعات از ظرفیت‌سازی جهت بازیافت و به تبع آن نرخ بازیافت در سال‌های اخیر، کاهش می‌یابد؛ اما در بلندمدت با افزایش ظرفیت بازیافت و نرخ بازیافت، این نسبت افزایش یافته تا به مقدار نهایی نرخ ضایعات قابل بازیافت دست می‌یابد.

تولید ضایعات الکترونیکی

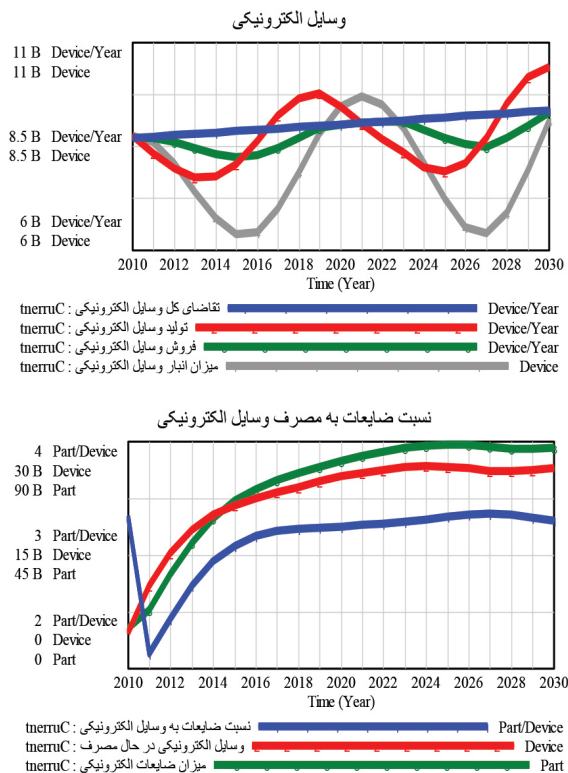


بازیافت وسایل الکترونیکی



شکل ۲۱: نمودار ضایعات الکترونیکی و بازیافت آن

براساس شکل (۲۲)، ابتدا به دلیل بالابودن رشد وسایل الکترونیکی مصرفی در حال استفاده، نسبت ضایعات به وسایل الکترونیکی کم شده است اما در بلندمدت این نسبت به فراخور رشد بیشتر ضایعات نسبت به وسایل الکترونیکی در حال مصرف، افزایش یافته است بنابراین رشد به صورت اس شکل (رشد ابتدایی شدید و کندشدن رشد در ادامه) می‌باشد. کندشدن رشد وسایل الکترونیکی در حال مصرف، به دلیل افت و خیز فروش وسایل الکترونیکی ناشی از نوسان در تولید و افت انبار وسایل الکترونیکی است.



## شکل ۲۲: نمودار وسایل الکترونیکی و نسبت ضایعات به مصرف وسایل الکترونیکی

برای شناسایی سناریوها و سیاست‌ها از دو مسیر استفاده شد؛ مسیر اول بر سؤالات (۳) تا (۵) پژوهش متمرکز بود و مسیر دوم نیز با تحلیل رفتار سیستم در حالت پایه و ساختار مدل جریان و علت و معلولی با شناسایی نقاط اهرمی صورت پذیرفت. نتایج در جدول (۲) تشریح شده‌اند.

جدول ۲: متغیرهای اهرمی برای طراحی سیاست یا سناریو

ردیف	نام متغیر	واحد	مسیر شناخت	مقدار موجود	مقدار در سناریو یا سیاست
۱	سرانه سالانه وسایل الکترونیکی فردی	وسيله به‌ازای هر نفر در سال	سؤال (۳) پژوهش	۱	۲
۲	سرانه سالانه وسایل الکترونیکی خانگی	وسيله به‌ازای هر خانوار در سال		۱	۲
۳	میانگین عمر مفید وسایل تولیدی	سال	تحلیل مدل و شناخت نقاط اهرمی	۳	۲
۴	مدت‌زمان موردنیاز برای تغییر ظرفیت بازیافت	سال	سؤال (۴)	۲	۱
۵	درصد ضایعات غیربازیافتی	درصد	تحلیل مدل و شناخت نقاط اهرمی	۳۰	۵۰
۶	تابع اثر نسبت ظرفیت بازیافت بر نحوه بازیافت	بدون بُعد	تحلیل مدل و شناخت نقاط اهرمی	شکل (۲۳) سمت راست	شکل (۲۳) سمت چپ

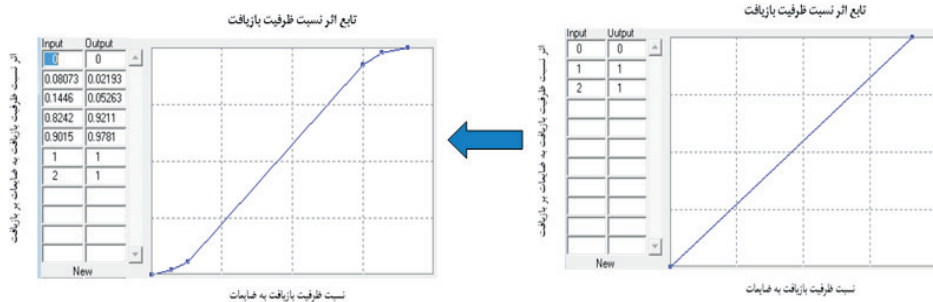
در ادامه سناریوها و سیاست‌های مختلف با توجه به ساختار و رفتار حاکم بر نظام ضایعات الکترونیکی ارائه و بر روی مدل اعمال شد:

- سناریوی (۱) - افزایش استفاده از وسایل الکترونیکی: در پاسخ به سؤال (۳) - مبنی بر اینکه تغییر الگوی مصرف چگونه بر میزان ضایعات الکترونیکی تأثیر می‌گذارد - این سناریو طراحی شد. به عبارت دیگر یکی از سناریوهای محتمل بر اساس توسعه فناوری و کاهش عمر فناوری‌های جدید این است که میانگین عمر مفید وسایل تولیدی کاهش می‌یابد و سرانه سالانه وسایل الکترونیکی فردی و خانگی افزایش می‌یابد.

- سیاست (۱) - توسعه ظرفیت‌های بازیافت: یکی از سیاست‌های مهم در حوزه مدیریت ضایعات، کاهش زمان برای تغییر ظرفیت بازیافت به همراه افزایش درصد ضایعات قابل بازیافت است.

به عبارت دیگر این سیاست به دنبال پاسخ به سؤال (۴) است که بر آثار ظرفیت‌سازی در بازیافت بر میزان ضایعات الکترونیکی تمرکز دارد.

- سیاست (۲) - مدیریت بازیافت: پس از سیاست توسعه ظرفیت بازیافت، نیاز به مدیریت بازیافت است؛ بنابراین در این سیاست برخلاف حالت‌های پیشین - که به صورت خطی تغییر می‌کرد و با فقدان ظرفیت اقدام خاصی صورت نمی‌پذیرفت - با تغییر ظرفیت بازیافت از طریق نوبت کاری اضافه، به کارگیری ظرفیت سایر کارخانه‌ها، استفاده از روش‌های مختلف بازیافت و غیره، میزان بازیافت به سرعت کاهش نمی‌یابد.



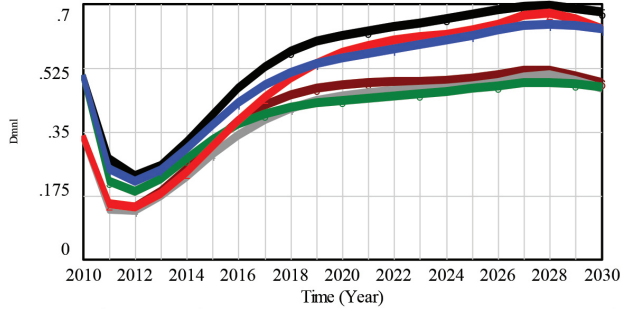
شکل ۲۳: تغییر تابع اثر در سیاست (۲)

با توجه به سناریو و دو سیاست مورد اشاره، رفتار مدل در ۶ حالت پایه، وقوع سناریوی (۱)، اجرای سیاست‌های (۱) و (۲)، وقوع سناریوی (۱) و اجرای هم‌زمان سیاست (۱) و بالاخره وقوع سناریوی (۱) و اجرای سیاست‌های (۱) و (۲) بررسی شده است.

طبق نمودار شکل (۲۴)، در سناریوی (۱) نسبت بازیافت به تولید ضایعات ابتدا کاهش یافته و سپس بیشتر از حالت پایه (وضع موجود) می‌شود. روند مذکور به این دلیل است که میزان تولید ضایعات از سال ۲۰۱۹ به بعد به ثبات رسیده است اما نرخ بازیافت کماکان دارای رشد است. در سیاست (۱) نسبت بازیافت به تولید ضایعات بیشتر از حالت پایه و سناریوی (۱) است چراکه ظرفیت‌سازی جهت ضایعات و به تبع آن رشد نرخ بازیافت افزایش می‌یابد. در سیاست (۲) به دلیل مدیریت بهتر ظرفیت بازیافت، نسبت بازیافت به ضایعات از همه حالت‌ها بهتر است چراکه از یک سو ضایعات زیاد نیست و از سوی دیگر مدیریت بهتری اعمال می‌شود. در حالت ترکیبی سیاست (۱) و سناریوی (۱)، نسبت

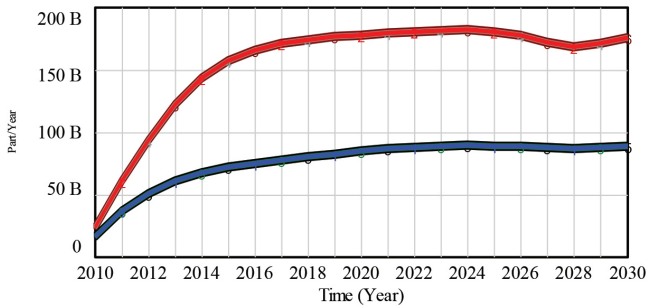
بازیافت به تولید ضایعات در ابتدا از سیاست (۱) و حالت پایه کمتر است اما در بلندمدت به مانند سیاست (۲) رفتار می‌کند و بیشتر نیز می‌شود. در سناریوی (۱) و حالت ترکیبی سناریوی (۱) و سیاست (۱)، میزان ضایعات به فراخور افزایش تولید وسایل الکترونیکی و عمر کوتاه استفاده از آن‌ها به شدت بیشتر از حالت پایه و سیاست (۱) است. به عبارت دیگر با تغییر الگوی مصرف وسایل الکترونیکی و افزایش آن، هرچند رفتار مدل تغییر نمی‌کند اما میزان ضایعات الکترونیکی افزایش می‌یابد و در سال ۲۰۳۰ حدوداً به دو برابر مقدار ضایعات با ادامه روند کنونی دست می‌یابد. در سیاست (۱)، تولید ضایعات تغییری نمی‌کند و به مانند حالت پایه است زیرا تغییری در تقاضای وسایل الکترونیکی و مصرف آن رخ نمی‌دهد. به عبارت دیگر در خصوص سؤال (۴) می‌بایست به این نکته اشاره کرد که ظرفیت‌سازی در بازیافت هرچند میزان بازیافت را بیشتر از حالت کنونی می‌کند اما بر مصرف وسایل الکترونیکی اثرگذار نیست؛ بنابراین نسبت به سناریوی (۱) از نظر کمی میزان بازیافت کمتر است؛ چراکه نیاز به بازیافت کمتر می‌باشد. در سناریوی (۱) بازیافت ابتدا از سیاست (۱) کمتر است اما در بلندمدت نسبت به سیاست (۱) و حالت پایه بیشتر می‌شود؛ چراکه اگرچه تقاضا (میزان ضایعات) افزایش می‌یابد اما با توجه به تأخیر و زمان‌بری ظرفیت‌سازی، نرخ بازیافت نیز افزایش می‌یابد. در حالت ترکیبی، بازیافت نسبت به حالت‌های قبلی افزایش می‌یابد زیرا ظرفیت و تقاضا برای بازیافت بیشتر است. از آنجاکه در حالت ترکیبی تولید ضایعات نیز بیشتر است، کمترین میزان دفن و سوزاندن ضایعات در صورت اجرای سیاست (۱) رخ می‌دهد. از سوی دیگر درآمد حاصل از بازیافت در حالت ترکیبی بیشتر از سایر حالت‌های بررسی شده می‌باشد. همچنین در سناریوی (۱) هرچند درآمد در کوتاه‌مدت نسبت به سیاست (۱) کاهش یافته است، اما در بلندمدت به علت حجم بالای تقاضای وسایل الکترونیکی و خرید بیشتر قطعات بازیافتی، درآمد افزایش می‌یابد؛ بنابراین رفتار مدل نشان می‌دهد که صنعت بازیافت وسایل الکترونیکی یکی از صنایع پردرآمد در حال حاضر و در سال‌های آینده به شمار می‌آید. در تحلیل کلی رفتار مدل تحت سیاست‌ها و سناریوهای مختلف مشخص است که میزان ضایعات وابسته به مصرف است و اثری بر میزان بازیافت ندارد؛ بنابراین در سناریوی (۱) و حالت‌های ترکیبی با سناریوی (۱)، میزان ضایعات بیشتر از حالت‌هایی است که این سناریو رخ نمی‌دهد. از سوی دیگر نسبت میزان بازیافت ضایعات به ظرفیت بازیافت، مدیریت صحیح آن و همچنین میزان ضایعات وابسته است و در نتیجه این شاخص در صورت اجرای سیاست (۱) وضعیت مطلوب‌تری خواهد داشت.

نسبت بازیافت وسایل الکترونیکی به تولید ضایعات



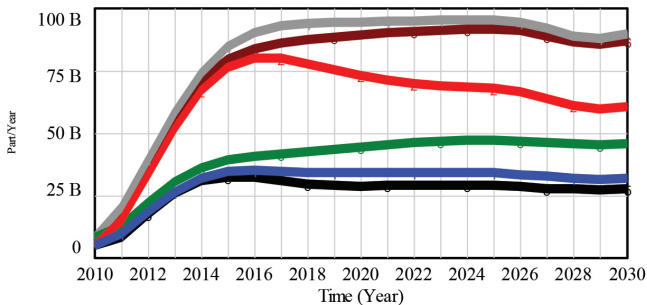
memrC : نسبت نرخ بازیافت به تولید ضایعات  
 1 oiraneCS : نسبت نرخ بازیافت به تولید ضایعات  
 1 ycilP : نسبت نرخ بازیافت به تولید ضایعات  
 1 ycilP & 1 oiraneCS : نسبت نرخ بازیافت به تولید ضایعات  
 2 ycilP : نسبت نرخ بازیافت به تولید ضایعات  
 noitanbmC : نسبت نرخ بازیافت به تولید ضایعات

میزان تولید ضایعات الکترونیکی



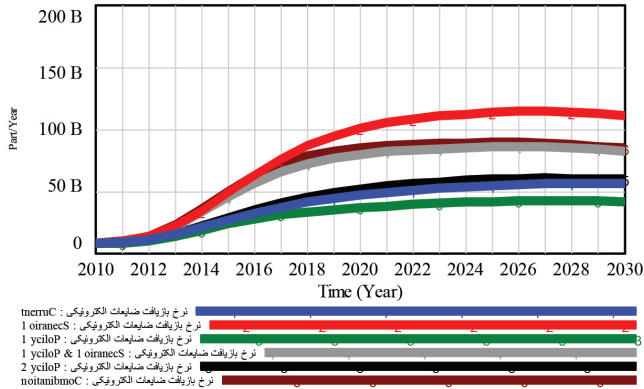
memrC : تولید ضایعات الکترونیکی  
 1 oiraneCS : تولید ضایعات الکترونیکی  
 1 ycilP : تولید ضایعات الکترونیکی  
 1 ycilP & 1 oiraneCS : تولید ضایعات الکترونیکی  
 2 ycilP : تولید ضایعات الکترونیکی  
 noitanbmC : تولید ضایعات الکترونیکی

دفن و سوزاندن ضایعات الکترونیکی

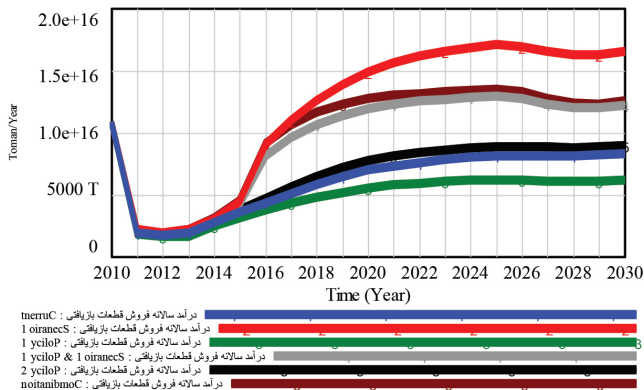


memrC : دفن و سوزاندن ضایعات الکترونیکی  
 1 oiraneCS : دفن و سوزاندن ضایعات الکترونیکی  
 1 ycilP : دفن و سوزاندن ضایعات الکترونیکی  
 1 ycilP & 1 oiraneCS : دفن و سوزاندن ضایعات الکترونیکی  
 2 ycilP : دفن و سوزاندن ضایعات الکترونیکی  
 noitanbmC : دفن و سوزاندن ضایعات الکترونیکی

## نرخ بازیافت وسایل الکترونیکی



## درآمد سالانه بازیافت



شکل ۲۴: شبیه‌سازی مدل براساس سناریو و سیاست‌های مدنظر

## بحث و نتیجه‌گیری

با افزایش میزان استفاده از وسایل الکترونیکی، تولید ضایعات الکترونیکی نیز افزایش می‌یابد. براین اساس کنترل و برنامه‌ریزی بازیافت ضایعات به‌فراخور ارزشمندی و آثار مخرب زیست‌محیطی آن‌ها ضروری است. در این راستا دو راهبرد و مسیر به‌کارگیری مواد کم‌خطر و سازگار با محیط‌زیست و بهبود فناوری بازیافت مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر با به‌کارگیری رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها و با استفاده از مدل‌سازی اسنادی و بررسی پیشینه موضوع، مدلی برای شناسایی ساختار حاکم بر ایجاد ضایعات الکترونیکی و بازیافت آن‌ها و پیش‌بینی میزان ضایعات، ظرفیت موردنیاز و درآمد بازیافت در

شرایط مختلف طراحی شده است.

در خصوص شناسایی ساختار حاکم بر تولید و بازیافت ضایعات الکترونیکی (سؤال اول پژوهش)، مشخص شد که تقاضای وسایل الکترونیکی به پویایی جمعیت و سرانه مصرف وابسته است. ظرفیت‌سازی جهت تولید وسایل الکترونیکی و تولید و فروش آن‌ها باتوجه به تقاضای وسایل الکترونیکی و عمر استفاده آن‌ها تعیین می‌شود. تولید ضایعات به مصرف وسایل الکترونیکی وابسته است که خود عاملی برای ظرفیت‌سازی به‌منظور بازیافت وسایل الکترونیکی می‌باشد. بازیافت وسایل الکترونیکی منجر به استفاده مجدد از آن‌ها در تولید وسایل الکترونیکی می‌شود و به درآمدزایی منتج می‌شود.

براساس مدل طراحی‌شده، میزان ضایعات الکترونیکی در سال‌های آینده در شرایط کنونی (سؤال دوم پژوهش) روند رشدی اس‌شکل خواهد داشت. این یافته با نتایج مطالعات پیشین نظیر آراجو و همکاران (۲۰۱۲) و کومار و همکاران (۲۰۱۷) از نقطه‌نظر رشد میزان ضایعات الکترونیکی مطابقت دارد اما پژوهش حاضر باتوجه به افق پیش‌بینی طولانی‌تر، محدودیت رشد در بلندمدت را نیز بازتاب داد؛ بنابراین مدل برخلاف ادعای کیوهر (۲۰۱۹) نشان داد که رشد ضایعات الکترونیکی رشد نمایی ندارد و در نهایت در سطح مشخصی متوقف می‌شود.

مدل در خصوص اثر تغییر الگوی مصرف بر میزان ضایعات الکترونیکی (سؤال سوم پژوهش) نشان داد که اگرچه رفتار مدل مشابه رفتار فعلی است اما تولید ضایعات الکترونیکی و در ادامه میزان بازیافت دو برابر می‌شود. مدل در خصوص اثر ظرفیت‌سازی در بازیافت بر میزان ضایعات الکترونیکی و میزان درآمدزایی بازیافت وسایل الکترونیکی (سوالات چهارم و پنجم پژوهش) و در راستای پژوهش پینهو و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان داد که تا زمانی که میزان ضایعات بر الگوی مصرف وسایل الکترونیکی اثر نگذارد، ظرفیت بازیافت نیز بر میزان ضایعات الکترونیکی اثر چندانی ندارد و تنها بازیافت جایگزین دفن و سوزاندن ضایعات می‌شود. همچنین میزان درآمد دارای حجم فراوان و رشد اس‌شکل می‌باشد که این یافته نیز با نتایج هدایتی آق‌مشهدی و همکاران (۲۰۱۴) مبنی بر رشد زیاد صنعت بازیافت در سال‌های آتی انطباق دارد. همچنین تحلیل رفتار مدل تحت سناریوها و سیاست‌های مختلف نشان داد که الگوی مصرف بر میزان ضایعات و بازیافت آن‌ها از نظر کمی مؤثر می‌باشد و ظرفیت و مدیریت صحیح نیز بر نسبت بازیافت ضایعات به ضایعات اثرگذار است.

لازم‌به‌ذکر است در این پژوهش تنها تولید و بررسی ضایعات الکترونیکی مصرفی (فردی و خانگی) بررسی شد و براین اساس در ادامه می‌توان این موضوع را به سایر بخش‌های ضایعات الکترونیکی



از جمله ضایعات الکترونیکی صنعتی، شهری و غیره بسط داد. فناوری اطلاعات نیز می‌تواند زمینه‌ساز افزایش عملکرد توسعه محصول جدید و بهبود قابلیت یکپارچگی زنجیره تأمین تولید شود (ابراهیم‌پور<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۸)؛ بنابراین نیاز است مدل‌سازی اثر فناوری اطلاعات بر بهبود فناوری‌های زنجیره تأمین و تولید و همچنین کاهش ضایعات غیرالکترونیکی بررسی شود تا نگرشی عمیق‌تر از اثر این فناوری بر حوزه ضایعات و محیط‌زیست حاصل گردد. از سوی دیگر توسعه فناوری بازیافت نیز می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد چراکه با پیشرفت فناوری و در نتیجه کاهش مواد مصرفی در وسایل الکترونیکی و گسترش قابلیت‌های قطعات الکترونیکی، حجم ضایعات کاهش می‌یابد. محدودیت دیگر پژوهش حاضر، عدم مدل‌سازی اثرات زیست‌محیطی ضایعات و سوزاندن و دفن آن‌ها است که می‌تواند در آینده مورد توجه قرار گیرد؛ چراکه با افزایش بازیافت، میزان دفن و سوزاندن ضایعات الکترونیکی کاهش می‌یابد و در نتیجه از پیامدهای محیط‌زیستی آن‌ها نیز کاسته می‌شود. در نهایت توسعه مدلی از ابعاد مختلف زنجیره تولید و بازیافت ضایعات الکترونیکی (به‌ویژه کیفیت قطعات بازیافتی و اثر آن‌ها بر محصولات الکترونیکی تولیدی) نیز برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

## منابع

- Alblooshi, B. G. K. M., Ahmad, S. Z., Hussain, M., & Singh, S. K. (2022). Sustainable management of electronic waste: Empirical evidences from a stakeholders' perspective. *Business Strategy and the Environment*, 31(4), 1856-1874. <https://doi.org/10.1002/bse.2987>
- Alimohammadi Asl, E., Bafandeh Zendeh, A., & Taghizadeh, H. (2020). Developing the strategies of the Islamic Azad University of Tabriz using the system dynamics approach [In Persian]. *Industrial Management Studies*, 15(3), 247-278. <https://doi.org/10.22054/jims.2019.45699.2369>
- Araújo, M. G., Magrini, A., Mahler, C. F., & Bilitewski, B. (2012). A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. *Waste Management*, 32(2), 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.020>
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources*. United Nations University, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association. [https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste\\_Monitor\\_2017\\_electronic\\_single\\_pages\\_.pdf](https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017_electronic_single_pages_.pdf)
- Barber, P., & López-Valcárcel, B. G. (2020). Forecasting the need for medical specialists in Spain: Application of a system dynamics model. *Human Resources for Health*, 8, 1-9, <https://doi.org/10.1186/1478-4491-8-24>
- Darabi, H., & Yaghmaei, S. (2012). Waste electrical and electronic equipment a valuable source for recycling [In Persian]. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 19 (62), 69-79, <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17355400.1391.11.62.8.2>
- Dehghan, H., & Ramezani, R. (2019). Causes of recession in the Iranian housing market and ways out of it using the dynamic system [In Persian]. *Industrial Management Studies*, 17(2), 109-126. <https://doi.org/10.22054/jims.2019.10269.1375>
- Dias, P., Bernardes, A. M., & Huda, N. (2018). Waste electrical and electronic equipment (WEEE) management: An analysis on the Australian e-waste recycling scheme. *Journal of Cleaner Production*, 197, 750-764. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.161>
- Dwivedy, M., & Mittal, R. K. (2009). Estimation of future outflows of e-waste in India. *Waste Management*, 30(3), 483-491. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.024>

- Ebrahimpour, M., Moradi, M., & Mirfallah Domochali, R. (2018). The impact of information technology capabilities and supply chain integrity capabilities on the new product development performance: The moderating role of knowledge absorptive capacity [In Persian]. *Journal of Technology Development Management*, 6(2), 109-136. <https://doi.org/10.22104/jtdm.2018.2870.1970>
- Forrester, J. (1980). Information sources for modeling the national economy. *Journal of the American Statistical Association*, 75(371), 555-566. <https://doi.org/10.1080/01621459.1980.10477508>
- Forrester, J., & Senge, P. (1980). Tests for building confidence in system dynamics models. *TIMS Studies in the Management Sciences*, 14, 209-228. <https://www.albany.edu/faculty/gpr/PAD724/724WebArticles/ForresterSengeValidation.pdf>
- Forti, V., Balde, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam. [https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/GEM\\_2020\\_def.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_def.pdf)
- Guarnieri, P., e Silva, L., Xavier, L., & Chaves, G. (2020). Recycling challenges for electronic consumer products to e-waste: A developing countries' perspective. In A. Khan, & A. M. Asiri (Eds.), *E-waste recycling and management - Present scenarios and environmental issues* (pp. 81-110). Springer Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14184-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14184-4_5)
- Haji Gholam Saryazdi, A. (2018). *Systems Dynamics and its various software training in simple language (introduction and training of 14 software), with a foreword by Dr. Alinaghi Mashayekhi* [In Persian]. Danesh Mandegar Asr Publications.
- Haji Gholam Saryazdi, A., Manteghi, M., & Zare Mehrjerdi, Y. (2013). *Dynamic System* [In Persian]. Alborz Diamond Publications.
- Haji Gholam Saryazdi, A., Rajabzadeh Ghatari, A., Mashayekhi, A.N., & Hassanzadeh, A. (2021). Crowd model building as a collective decision support system. *International Journal of Decision Support Systems*, 4(3), 177-216. <https://doi.org/10.1504/IJDSS.2021.10036043>
- Haji Gholam Saryazdi, A., & Sohrabi, S. (2020). Dynamics of the impact of

- Yazd IT incubator policies on the resilience of its firms [In Persian]. *Journal of Technology Development Management*, 8(2), 177-208.  
<https://doi.org/10.22104/jtdm.2020.4214.2526>.
- Hedayati Aq Mashhadi, A., Jafari, H. R., Karami, S., Galalizadeh, S., & Zahedi, S. (2014). Estimation of economic value of recyclable iron, aluminum and copper in electronic waste (Case study: Region 6 of Tehran) [In Persian]. *Environmental Science*, 40(4), 999-1009. <https://doi.org/10.22059/jes.2014.53015>
- Kahhat, R., Kim, J., Xu, M., Allenby, B., Williams, E., & Zhang, P. (2008). Exploring e-waste management systems in the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(7), 955-964. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.03.002>
- Kamali Saraji, M., & Morovati Sharifabadi, A. (2017). Application of system dynamics in forecasting: A systematic review. *International Journal of Management, Accounting and Economics*, 4(12), 1192-1205. [https://www.ijmae.com/article\\_115223.html](https://www.ijmae.com/article_115223.html)
- Khatami Firoozabadi, M. A., Abbasi Azar, A., Taghva, M. R., & Faizi, K. (2019). Evaluation model of electronic services of public institutions (Case study of Tehran municipality) [In Persian]. *Industrial Management Studies*, 17(4), 1-33.  
<https://doi.org/10.22054/jims.2019.24225.1833>
- Kuehr, R. (2019). E-waste seen from a global perspective. In V. Goodship, A. Stevels, & J. Huisman (Eds.), *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook* (pp. 1-16). Woodhead Publishing.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102158-3.00001-X>
- Kumar, A., Holuszko, M., & Espinosa, D. (2017). E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.018>
- Manavi Zade, N., Agha Mohammadi Bosjin, S., & Karimi Ashtiani, P. (2020). Solving the inventory routing problem of the hazardous waste collection network considering the internal and external transportation fleet [In Persian]. *Industrial Management Studies*, 18(3), 215-245. <https://doi.org/10.22054/jims.2019.44492.2346>
- Méndez-Fajardo, S., Böni, H., Vanegas, P., & Sucozhañay, D. (2020). Improving sustainability of e-waste management through the systemic design of solutions: The cases of Colombia and Ecuador. In M. N. V. Prasad, M. Vithanage, & A. Borthakur (Eds.), *Handbook of electronic waste management - International best practices and case studies* (pp. 443-478). Butterworth-Heinemann.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817030-4.00012-7>

- Nikbeen, H., Badizadeh, A., Davari, A., & Hosseininia, G. (2018). An effective business model in the field of electronics business using repertory grid technique [In Persian]. *Journal of Technology Development Management*, 6(2), 137-159.  
<https://doi.org/10.22104/jtdm.2018.2802.1946>
- Ottiger, F., Schröder, P., & Schluep, M. (2019). *Downstream technology option for e-waste recycling*. Deutsche Gesellschaft Für.  
<https://www.giz.de/en/downloads/giz2019-en-business-option-e-waste-recycling.pdf>
- Perkins, D. N., Brune Drisse, M., Nxele, T., & Sly, P. D. (2014). E-Waste: A global hazard. *Annals of Global Health*, 80(4), 286-295.  
<https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.10.001>
- Pinho, S., Ferreira, M., & Almeida, M. F. (2018). A wet dismantling process for the recycling of computer printed circuit boards. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.022>
- Shamim, A., Mursheda, A. K., & Rafiq, I. (2015). E-waste trading impact on public health and ecosystem services in developing countries. *International Journal of Waste Resources*, 5(4), 1-12. 188. <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000188>
- Shokoohyar, S., & Akbari, I. (2016). Designing a model for sustainable development of e-waste recycling [In Persian]. *Production and Operations Management*, 7(2), 137-152. <https://doi.org/10.22108/jpom.2016.21097>
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill Publishing.
- Tiseo, Ian. (2020a, March 4). *Global e-waste documented to be collected and recycled 2019, by region*. Statista.  
<https://www.statista.com/statistics/1154648/ewaste-collected-recycling-worldwide-by-region>
- Tiseo, Ian. (2020b, March 4). *Consumer markets - Household appliances - Europe*. Statista.  
<https://www.statista.com/outlook/16000000/102/household-appliances/europe#market-revenue>
- Tiseo, Ian. (2020c, March 4). *Global e-waste generation per capita 2010-2019*. Statista.  
<https://www.statista.com/statistics/499904/projection-ewaste-generation-per-capita-worldwide>
- Tiseo, Ian. (2020d, March 4). *Global e-waste generation 2010-2019*. Statista.

<https://www.statista.com/statistics/499891/projection-ewaste-generation-worldwide>

Van Yken, J., Boxall, N. J., Cheng, K. Y., Nikoloski, A. N., Moheimani, N. R., & Kaksonen, A. H. (2021). E-waste recycling and resource recovery: A review on technologies, barriers and enablers with a focus on Oceania. *Metals, 11*(8), 1313. <https://doi.org/10.3390/met11081313>

Worldometers. (2020, April 21). *World population*. Worldometers <https://www.worldometers.info/world-population>