Journal of Intelligent Strategic Management
Vol(4), 555-580.
Bumara.ir

Providing a predictive model for energy consumption in a sustainable circular supply chain using artificial neural networks

Abolfazl Ghaderi *

Department of Business Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

Abstract

The increasing energy consumption and the expansion of supply chains with environmental approaches have become one of the main challenges of energy management in industrial and economic systems. In this regard, the use of predictive models based on artificial intelligence can play an effective role in optimizing energy consumption. The present study aims to provide a model for predicting energy consumption in a sustainable circular supply chain. In this model, variables such as production volume, volume of returned products, volume of recycled products, volume of repaired products, volume of customers, and employment rate are considered as key inputs. The results showed that the proposed model is able to predict energy consumption with an accuracy of 79%. The findings also indicate that the artificial neural network (ANN) provides the highest accuracy and the lowest error rate in prediction compared to other analytical approaches. The sensitivity analysis of the model also showed that increasing the volume of returned products has the greatest impact on increasing energy consumption in a sustainable circular supply chain. Accordingly, paying attention to the management of returned products and optimizing related processes can be an effective step towards reducing energy waste and achieving sustainability goals in modern supply chains.

Keywords: Forecasting, Energy, Sustainable Supply Chain, Machine Learning

How to Cite: Ghaderi,A. (2025). Providing a predictive model for energy consumption in a sustainable circular supply chain using artificial neural networks. Journal of Intelligent Strategic Management, 3(4), 555-580.

doi: bumara.2026.373601.4839

Intelligent Strategic Management (JISM) in Development and Evolution is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

© Authors

* **Corresponding Author:** Agh951@gmail.com

Original Research
Received: 2025/01/28
Review: 2025/03/04
Accepted: 2025/03/18
eISSN: 2891-4128

نشریه مدیریت استراتژیک هوشمند
دوره ۳، شماره ۴ زمستان، ۱۴۰۳، ۵۸۰- ۵۵۵
Bumara.ir

ارائه مدلی پیش‌بینانه برای مصرف انرژی در زنجیره تأمین چرخشی پایدار با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

ابوالفضل قادری*

گروه مدیریت بازرگانی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران.

مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۱۱/۰۹
بازنگری:۱۴۰۳/۱۲/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸
eISSN:2891-4128

چکیده

افزایش روزافزون مصرف انرژی و گسترش زنجیره‌های تأمین با رویکردهای زیست‌محیطی، به یکی از چالش‌های اصلی مدیریت انرژی در نظام‌های صنعتی و اقتصادی تبدیل شده است. در این راستا، بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بین مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند نقش مؤثری در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا کند. پژوهش حاضر با هدف ارائه‌ی مدلی برای پیش‌بینی مصرف انرژی در زنجیره تأمین چرخشی پایدار انجام شده است. در این مدل، متغیرهایی نظیر حجم تولیدات، حجم محصولات بازگشتی، حجم محصولات بازیافتی، حجم محصولات تعمیری، حجم مشتریان و میزان اشتغال به‌عنوان ورودی‌های کلیدی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاصل نشان داد که مدل پیشنهادی قادر است با دقتی معادل ۷۹ درصد میزان مصرف انرژی را پیش‌بینی نماید. همچنین یافته‌ها بیانگر آن است که شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در مقایسه با سایر رویکردهای تحلیلی، بالاترین دقت و کمترین میزان خطا را در پیش‌بینی ارائه می‌دهد. تحلیل حساسیت مدل نیز نشان داد که افزایش حجم محصولات بازگشتی، بیشترین تأثیر را بر افزایش مصرف انرژی در زنجیره تأمین چرخشی پایدار دارد. بر این اساس، توجه به مدیریت بازگشت محصولات و بهینه‌سازی فرآیندهای مرتبط می‌تواند گامی مؤثر در جهت کاهش اتلاف انرژی و تحقق اهداف پایداری در زنجیره‌های تأمین نوین باشد.

کلیدواژه‌ها: پیش بینی، انرژی، زنجیره تامین پایدار، یادگیری ماشین

استناد به این مقاله: قادری، ابوالفضل . (۱۴۰۳). ارائه مدلی پیش‌بینانه برای مصرف انرژی در زنجیره تأمین چرخشی پایدار با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی.مدیریت استراتژیک هوشمند, ۳(۴), ۵۵۵-۵۸۰.

مدیریت استراتژیک هوشمند (JISM) در توسعه و تکامل تحت مجوز بین‌المللی کریتیو کامنز با شرایط انتساب-غیرتجاری ۴,۰ منتشر می‌شود.

©نویسندگان

* **نویسنده مسئول:** Agh951@gmail.com

مقدمه

مصرف انرژی یک دغدغه مهم برای تمامی صنایع به شمار می رود در جهان امروز بیش از گذشته مدیران صنایع و زنجیره های تامین به دنبال حداقل ساختن مصرف انرژی می باشند(افروزی و همکاران،۲۰۲۵) البته این موضوع شاید در گذشته اهمیت چندانی به ویژه در کشورهای دارای منابع غنی انرژی نداشت اما امروزه شرایط کاملا تغییر کرده و محدودیتها منجر به این شده که مدیران به سمت حداقل ساختن مصرف انرژی به مثابه حداقل ساختن هزینه و سایر اهداف مهم و استراتژیک موجود در زنجیره های تامین گام بردارند(لیو و همکاران،۲۰۲۵).

زنجیره های تامین نیز در گذر زمان اشکال متفاوتی پیدا کرده است به عنوان نمونه زنجیره های تامین همچون گذشته صرفا به ارسال کالا و محصول به انتهای زنجیره مبادرت نورزیده و بازگشت محصول و شکل گیری مفهومی تحقیق عنوان اقتصاد چرخشی نیز مطرح است(دوان و همکاران،۲۰۲۵) در اقتصاد چرخشی به دلیل کمبود منابع تمامی محصولات تولید شده امکان بازگشت به چرخه و سوداوری مجدد را با تبدیل آنها به مواد خام و محصولات بازتعمیری دارا می باشند. بنابراین در زنجیره تامین چرخشی تمامی فرایندها می تواند برای اعضای زنجیره درامد زا بوده و تمامی محصولات در بخشهای مختلف زنجیره به چرخش در می آیند(رائو همکاران،۲۰۲۵)

زنجیره تامین مهم دیگری که در عصر کنونی تاکید بسیاری بر آن صورت گرفته است زنجیره تامین پایدار است در زنجیره تامین پایدار سه رکن اقتصادی ، زیست محیطی و اجتماعی مطرح می باشد که زنجیره تامین به دنبال بهینه سازی هر سه رکن است(ژو و همکاران،۲۰۲۵). در این زنجیره هیچ رکنی فدای رکن دیگر نمی شود نه می تواند محیط زیست و نه اشتغال را قربانی کاهش هزینه یا سوداوری نمود. هر سه هدف در زنجیره های تامین پایدار دنبال می شود. ترکیب زنجیره های تامین پایدار و چرخشی یک زنجیره تامین مطلوب را ایجاد می کند که در آن تلاش می شود سوداوری زنجیره با تحقق اقتصاد چرخشی حداکثر شده و در عین حال مسائل زیست محیطی و اشتغال نیز بهبود یابد(باری و همکاران،۲۰۲۴). بنابراین در این حیطه مصرف انرژی یک هدف مهم است چرا که همانگونه که ذکر شده مسائل زیست محیطی در اقتصاد چرخشی حائز اهمیت بوده و لذا مصرف انرژی یکی از زیرشاخه های مسائل زیست محیطی را شامل می شود بهبود مصرف انرژی می تواند اثر بسزائی در بهبود مسائل زیست محیطی برجا بگذارد(محمود و همکاران،۲۰۲۴).

با توجه به اینکه تحقیقات پیشین در حوزه زنجیره تامین چرخشی پایدار به پیش بینی مصرف انرژی در این نوع زنجیره ها توجهی نداشته و بر اساس مرور ادبیات انجام شده تحقیقی با تمرکز بر زنجیره تامین چرخشی پایدار و پیش بینی مصرف انرژی در ادبیات حوزه مطالعاتی به چشم نمی خورد لذا تحقیق حاضر برای نخستین بار در ادبیات تحقیق به پیش بینی مصرف انرژی در زنجیره تامین چرخشی پایدار می پردازد در واقع منظور از انرژی کل سوخت و انرژی است که توسط تمامی گره ها در یک زنجیره تامین چرخشی پایدار مصرف می شود. در این زنجیره به دلیل وجود گره های زیاد که شامل گره های مرتبط با محصولات بازگشتی می باشد مصرف انرژی افزایش یافته و لذا پیش بینی ان اهمیت دارد. داده ها از مجموعه ای از زنجیره های تامین با ویژگیهای چرخشی و پایدار نظیر زنجیره های تامین خودرو و صنایع فلزی جمع اوری شده و سپس با الگوریتمهای یادگیری ماشین پیش بینی مصرف انرژی صورت می گیرد. الگوریتمهای مورد استفاده شامل الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون خطی چندگانه می باشند که با بهره گیری از دیتاست مرتبط با زنجیره های تامین ذکر شده پیاده سازی انها صورت گرفته و بر اساس میزان دقت و خطا بهترین الگوریتم انتخاب شده و عوامل اثرگذار شناسائی می شود. ضمن اینکه در ادامه تحلیل حساسیت متغیرها و اثر انها بر مصرف انرژی بررسی می شود.

ساختار مقاله حاضر به این صورت که در ادامه مرور ادبیات ارائه شده و سپس روش شناسی تشریح میشود پس از آن تحلیل یافته ها صورت گرفته و در انتها نتیجه گیری ارائه می شود.

مرور ادبیات و پیشینه تحقیق

در این بخش به معرفی مهمترین تحقیقات در حوزه مورد مطالعه پرداخته می شود تحقیقات انجام شده عمدتا متمرکز بر کاربرد و استفاده از یادگیری ماشین در پیش بینی مصرف انرژی در زنجیره های تامین بوده و عمدتا تحقیقات ۵ سال اخیر را شامل می شود. در انتهای این بخش شکاف تحقیقاتی بر اساس جدول مرور ادبیات استخراج شده از مقالات مطالعه شده بدست می آید. پررا[1]و همکاران(۲۰۱۹) کاربرد یادگیری ماشین را در بهینه سازی سیستم انرژی مورد بررسی قرار می دهند. هان و ژانگ[2](۲۰۲۰) به بهینه سازی مدیریت کارامدی زنجیره تامین بر اساس شبکه عصبی مصنوعی و یادگیری ماشین می پردازند. کرکوریا استریت[3]و همکاران(۲۰۲۱) مدیریت زنجیره تامین پایدار را در مسیر برای اقتصاد چرخشی

[1] Pereraa et al
[2] Chaoliang han and Qi Zhang
[3] Jorge Alfredo Cerqueira-Streit et al

بر اساس یک مرور ادبیات ترکیبی مورد بررسی وکنکاش قرار می دهند. توره[1]و همکاران(۲۰۲۱) نقش بازیهای جدی و شبیه سازی را در مفاهیم مرتبط با انرژی پایدار و اقتصاد چرخشی مورد بررسی قرار می دهند. جمیل[2]و همکاران(۲۰۲۱) مکانیزم تجارت انرژی قرین به قرین را بر اساس بلاک چین و یادگیری ماشین برای تامین انرژی الکتریکی پایدار در شبکه هوشمند پیاده سازی می کنند.

یانگ[3]و همکاران(۲۰۲۲) به مروری بر کاربرد تکنیکهای یادگیری ماشین در مسائل بهینه سازی ترکیبی در حوزه انرزی می پردازند. الذوبی[4](۲۰۲۲) از تکنیکهای یادگیری ماشین برای مصرف انرژی هوشمند در خانه های هوشمند بهره می گیرند. تیراوراویت[5]و همکاران(۲۰۲۲) به مدیریت زنجره تامین پایدار در اقتصاد چرخشی با استفاده از یک مرور ادبیات جامع می پردازد.

انوکوولو[6]و همکاران(۲۰۲۳) به توسعه چارچوبی برای بهینه سازی مبتنی بر هوشمند مصنوعی در زنجیره های تامین در بخش انرژی توجه دارند. جامپانی[7]و همکاران(۲۰۲۳) به استفاده از الگوریتمهای یادگیری ماشین برای بهینه سازی در زنجیره تامین به صورت کلی آن می پردازند. مالوترا[8](۲۰۲۳) به اثر شاخصه های اقتصادی چرخشی بر قابلت انعطاف پذیری و عملکرد زنجیره تامین پایدار توجه دارند. باگواری[9]و همکاران(۲۰۲۳) مدل بهینه سازی انرژی را برای شبکه های سنسور بی سیم صنعتی با استفاده از الگوریتمهای یادگیری ماشین ارائه می کنند.

لیو و همکاران(۲۰۲۴) به بهینه سازی اقتصاد چرخشی در زنجیره تامین سبز در شهرهای هوشمند با ترکیبی از تکنیکهای یادگیری ماشین می پردازند آلیجویو (۲۰۲۴) از تکنیکهای یادگیری عمیق برای صنعت نسل چهارم پایدار و اینترنت اشیا استفاده کرده و به ارتقای مدیریت انرژی در ساختمانهای هوشمند می پردازند.

---

[1] Rocio de la Torre et al
[2] FAISAL JAMIL et al
[3] Xinyi Yang et al
[4] Asem Alzoubi
[5] Monrudee Theeraworawit et al
[6] Ekene Cynthia Onukwulu et al
[7] Sridhar Jampani et al
[8] Gunjan Malhotra
[9] ASHISH BAGWARI et al

باری و همکاران(۲۰۲۴) به اعمال تکنیکهای یادگیری ماشین برای بهینه سازی انرژی تجدید پذیر در اقتصادها رو به توسعه می پردازند. محمود[1]و همکاران(۲۰۲۴) رویکرد یادگیری ماشین مبتنی بر یادگیری فعال را برای ارتقای پایداری زیست محیطی در مصرف انرژی ساختمانهای سبز مورد بررسی قرار می دهند.

ژو[2]و همکاران(۲۰۲۵) بهینه سازی پایدار در مدیریت زنجیره تامین را با استفاده از روشهای یادگیری ماشین در برنامه تحقیقاتی خود قرار دادند. رائو[3]و همکاران(۲۰۲۵) به پیش بینی تقاضا و بهینه سازی تخصص انرژی در زنجیره تامین سبز بر اساس الگوریتمهای یاد گیری ماشین می پردازند. این تحقیق بر اساس داده های مواد شبکه انرژی انجام شد. دوآن[4]و همکاران(۲۰۲۵) به نقش پایداری زیست محیطی و تکنولوژی در زنجیره های تامین چرخشی بر اساس مدل تاپسیس می پردازد.

افروزی[5]و همکاران(۲۰۲۵) به عملیات اقتصادی چرخشی باطری لیتیوم یون در وسایل الکتریک در زنجره تامین پایدار توجه دارد. لیو و چن[6](۲۰۲۵) به کاربرد وروند یادگیری ماشین در بهینه سازی انرژی با استفاده از یک تحلیل کتابشناسی می پردازد. جوشان[7](۲۰۲۵) از تکنیکهای یادگیری ماشین پیشرفته برای بهینه سازی شبکه هوشمند و مدیریت انرژی بهره می گیرند. لیو[8]و همکاران(۲۰۲۵) بهینه سازی زنجیره تامین پاک را به منظور حمل و نقل گاز طبیعی در وضعیت پایدار انجام می دهند.

---

[1] Shahid Mahmood et al
[2] Junlin Zhu et al
[3] Hanyu Rao et al
[4] Yongrui Duan et al
[5] Mohsen Alizadeh Afroozi et al
[6] Jingyi Liu and Jianfei Chen
[7] Alireza Joshan
[8] Zhongfu Liu et al

جدول ۱: مرور ادبیات

ردیف	محققین	سال	یادگیری ماشین	مدیریت انرژی	زنجیره تامین چرخشی	زنجیره تامین پایدار	اینترنت اشیا
1	پررا و همکاران	2019	□	□			
2	هان و ژانگ	2020	□				
3	کرکوریا استریت و همکاران	2021			□	□	
4	توره و همکاران	2021			□	□	
5	جمیل و همکاران	2021	□	□			□
6	یانگ و همکاران	2022	□	□			
7	الذوبی	2022	□	□			
8	تیراوراویت و همکاران	2022			□	□	
9	انوکوولو و همکاران	2023	□	□			
10	جامپانی و همکاران	2023	□				
11	مالوترا	2023			□	□	
12	باگواری و همکاران	2023	□	□			
13	لیو و همکاران	2024	□		□		
14	آلیجویو	2024	□	□			
15	باری و همکاران	2024	□	□			
16	محمود و همکاران	2024	□	□		□	
17	ژو و همکاران	2025	□			□	
18	رائو و همکاران	2025	□	□			
19	دوان و همکاران	2025			□		
20	افروزی و همکاران	2025			□	□	
21	لیو و چن	2025	□	□			
22	جوشان	2025	□	□			
23	لیو و همکاران	2025		□		□	
24	تحقیق حاضر		□	□	□	□	□

بر اساس مرور ادبیات انجام شده می توان مشاهده کرد که تحقیقات انجام شده عمدتا متمرکز بر یادگیری ماشین و کاربرد آن در مصرف انرژی بوده و بسیاری از آنها فاقد مدل بوده و صرفا به مرور ادبیات در این زمینه می پردازد. ضمن اینکه تحقیقی که مصرف انرژی را در زنجیره تامین چرخشی پایدار مورد مطالعه قرار داده باشد در ادبیات تحقیق به چشم نمی خورد و از این جهت در این خصوص شکاف تحقیقاتی به چشم می خورد. تحقیق حاضر با در نظر گرفتن این شکاف به دنبال ارائه مدلی برای پیش بینی مصرف انرژی در زنجیره تامین چرخشی پایدار است که تاکنون در ادبیات تحقیق به آن پرداخته نشده است.

روش شناسی تحقیق

در این بخش به معرفی روش شناسی تحقیق حاضر پرداخته می شود تحقیق حاضر از نظر هدف کاربردی و از نوع توسعه ای تبیینی بوده و به بهینه سازی انرژی مبتنی بر پیش بینی آن در یک زنجیره تامین چرخشی پایدار می پردازد زنجیره تامین مورد نظر از نوعی است که در ان محصولات از انتهای زنجیره به ابتدای آن بازگشت و علاوه بر ساختار زنجیره تامین معمول که دارای وضعیت ارسال کالا به انتهای زنجیره می باشد امکان بازگشت کالا از انتهای زنجیره به دلیل نیاز به تعمیرات و اصلاح و همچنین بازیافت به واسطه قرار گرفتن کالا در معرض انتهای چرخه عمر وجود دارد. بنابراین غیر از فعالیتهای تامین، تولید و توزیع، فعالیتهای امحا، بازیافت و بازتولید نیز در این زنجیره وجود دارد. این فعالتیها همگی انرژی بر بوده و حد مشخصی از انرژی را مصرف می کنند. هدف در این تحقیق پیش بینی میزان مصرف انرژی در زنجیره تامین چرخشی پایدار بر اساس داده های گذشته و شناسائی عوامل موثر در مصرف انرژی و بهبود انها می باشد.

داده ها از طریق دیتاست جمع اوری می شود که شامل متغیرهای ورودی می باشد که تعیین کننده میزان مصرف انرژی می باشد در مدل ارائه شده هدف سنجش میزان اثرگذاری کل این متغیرها بر میزان مصرف انرژی کل در زنجیره تامین چرخشی پایدار بوده و سپس مشخص می شود که کدامیک از متغیرها دارای اثرگذاری بیشتری می باشند در ادامه این متغیرها در جدول ذیل معرفی می شوند.

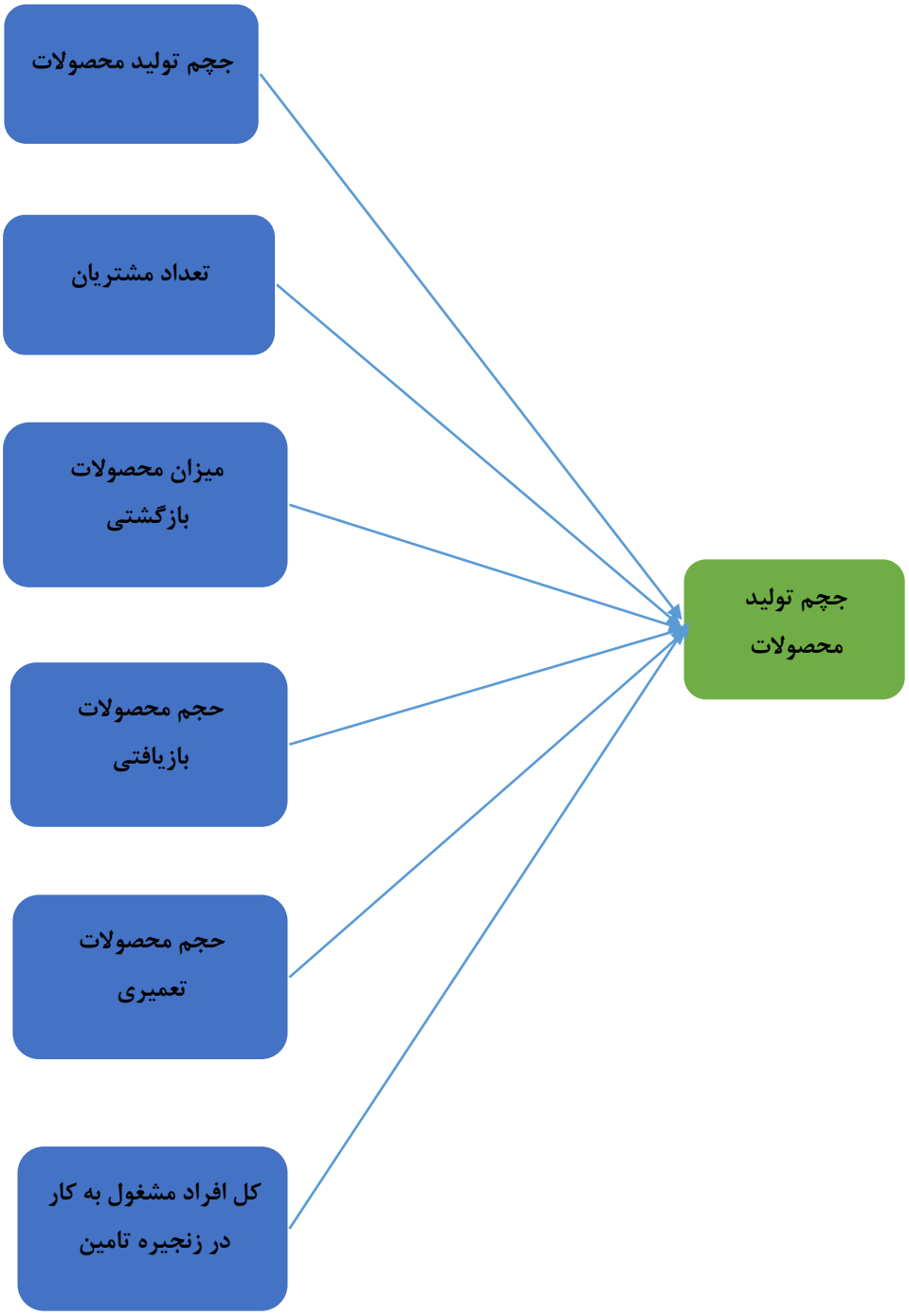
جدول ۲: متغیرهای تحقیق

ردیف	عنوان متغیر	نماد متغیر	نوع متغیر	مقیاس متغیر
۱	حجم تولید محصولات	X1	ورودی	کمی
۲	تعداد مشتریان	X2	ورودی	کمی
۳	میزان محصولات بازگشتی	X3	ورودی	کمی
۴	حجم محصولات بازیافتی	X4	ورودی	کمی
۵	حجم محصولات تعمیری	X5	ورودی	کمی
6	کل افراد مشغول به کار در زنجیره تامین	X6	ورودی	کمی
7	میزان مصرف انرژی	X6	خروجی	کمی

با توجه به اینکه مرور ادبیات تحقیق در حوزه عوامل تعیین کننده مصرف انرژی در زنجیره تامین چرخشی پایدار وجود ندارد لذا متغیرهای فوق بر اساس نظر خبرگان در حوزه زنجیره تامین چرخشی پایدار استخراج شده است که بر اساس تجارب پیشین و همچنین عوامل اثرگذار بر مصرف انرژی این متغیرها بدست آمده اند.

داده ها از زنجیره تامین چرخشی پایدار در ارتباط با عواملی نظیر تعداد مشتریان ، میزان محصولات بازگشتی، حجم محصولات بازیافتی و سایر متغیرها استخراج شده و بر این اساس میزان مصرف انرژی در زنجیره تامین چرخشی پایدار پیش بینی می شود.

مدل فوق را می توان به صورت مدل مفهومی ذیل ترسیم نمود.



شکل ۱: مدل مفهومی تحقیق حاضر

تکنیکهای تجزیه و تحلیل اطلاعات در تحقیق حاضر شامل سه الگوریتم یادگیری ماشین می باشد این الگوریتمها به شرح ذیل هستند"

- ✓ الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی
- ✓ الگوریتم ماشین بردار پشتیبان
- ✓ الگوریتم رگرسیون خطی چندگانه

الگوریتمهای فوق از نوع پیش بینی می باشند چرا که آنها به براورد رقم مصرف انرژی در زنجیره های تامین چرخشی پایدار می پردازند و اساسا با الگوریتمهای مبتنی بر دسته بندی متفاوت هستند البته باید اشاره شود که الگوریتمهای فوق هم از نوع دسته بندی و هم از نوع پیش بینی می باشند اما در تحقیق حاضر از نوع پیش بینی این الگوریتمها استفاده می شود چرا که هدف تعیین عدد مصرف انرژی است و نه دسته بندی. الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی در زمره مهمترین الگوریتمها در خصوص پیش بینی به شمار می رود که کاربرد خود را در بسیاری از تحقیقات مشابه نشان داده است الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نوع دیگری از الگوریتمهای یادگیری ماشین در حوزه پیش بینی می باشد که این الگوریتم نیز کاربرد بسیاری در ادبیات تحقیق داشته و الگوریتم رگرسیون خطی چندگانه که از نوع کلاسیک الگوریتمهای یادگیری ماشین بوده و در مسائل اقتصاد سنجی نیز کاربرد داشته است. در این تحقیق به منظور مقایسه با سایر الگوریتمها مورد استفاده قرار می گیرد.

معیار مقایسه الگوریتمها معرفی شده در تحقیق حاضر میزان دقت و خطا می باشد در تحقیق حاضر به منظور پیش بینی دقت و خطا از دو خطا استفاده می شود اولین مورد خطای مجذور میانگین ریشه و دومی خطای درصد مطلق میانگین است فرمولهای مربوطه به شرح ذیل اورده شده است

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Er_i - E_i)^2} \quad (1)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{Er_i - E_i}{Er_i}\right| * 100\% \quad (2)$$

دررابطه 1 , 2 Er_i و E_i به پیش بینی مصرف انرژی برای هر گره می پردازد RMSE مجذور میانگین مجذورات تمایزات بوده و نشانگر میزان نزدیکی مقادیر داده های مشاهده

شده به مقادیر پیش بینی شده است. اما خطای درصد مطلق میانگین نشانگر میانگین خطاهای پیش بینی برای دوره مورد ازمایش است.

الگوریتمهای فوق با استفاده از زبان پایتون پیاده سازی شده و پس از ورود کتابخانه های مناسب و FIT کردن مدل پیش بینی انجام شده و نتایج حاصل از دقت و خطا ارائه شده و در انتها نیز میزان اثرگذاری متغیرهای مختلف ارائه شده و پیشنهادات جهت بهبود نتایج تبیین می شود. لازم به ذکر است به منظور تخمین مصرف انرژی از فرمول ذیل که به محاسبه R می پردازد استفاده می شود

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum(Y_t - \bar{Y})^2}$$

(۳)

در رابطه ۳

$$\sum(\hat{Y}_t - \bar{Y})^2$$

(۴)

تغییرات توضیح داده شده در متغیر وابسته که در تحقیق حاضر میزان مصرف انرژی می باشد و به صورت Y نشان داده می شود

$$\sum(Y_t - \bar{Y})^2$$

(۵)

رابطه ۵ نشانگر تغییرات کل در Y می باشد(یوریکا،۲۰۲۵).

مقدار R2 بین صفر و۱ می باشد هر چه این مقدار به ۱ نزدیکتر باشد نشانگر قدرت بالای پیش بینی الگوریتم مورد استفاده می شود و هر چه به صفر نزدیکتر باشد نشانگر قدرت پائین پیش بینی است که مقدار ۰ نشانگر عدم ارتباط با متغیر مصرف انرژی از سوی متغیرهای پیش بینی کننده می باشد در صورت افزودن متغیرهای مستقل و با توجه به شکل گیری عرض از مبداهای جدید اعتبار پارامتر R2 کاهش یافته و لذا جایگزین آن که می تواند ایرادات این پارامتر را مرتفع نماید ضریب تعدیل تعدیل شده می باشد هر چه تفاوت بین R2 و R2 تعدیل شده کمتر باشد می توان گفت متغیرهای مستقل افزوده شده به مدل دارای اعتبار بیشتری بوده و به شکل مناسبتری انتخاب شده اند فرمول R2 تعدیل شده به شرح رابطه ۶ است. (۶)

$$Adjusted\ R2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(N - 1)}{N - P - 1}$$

در رابطه ۶

N

تعداد مشاهدات

P تعداد متغیرهای مستقل

R2

ضریب R2

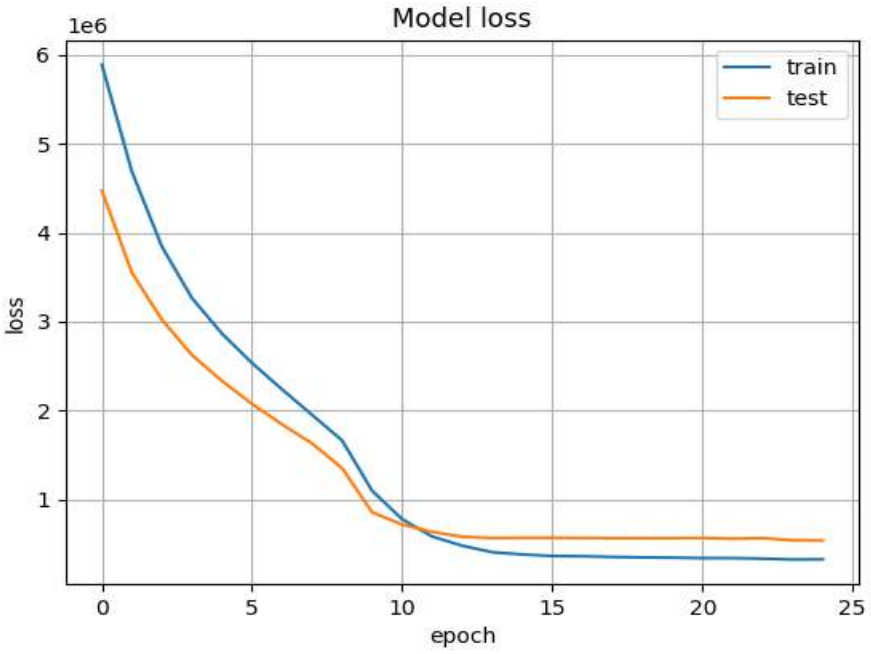
ضریب R2 بر این فرض بنا شده است که هر متغیر مستقل مشاهده شده در مدل در تغییرات متغیر وابسته نقش دارد. بنابراین درصد نشان داده شده ضریب تشخیص بر اساس تاثیر همه متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته است

این مراحل و اقدامات در بخش تجزیه و تحلیل انجام می پذیرد. خلاصه مراحل انجام تحقیق به شرح ذیل است:

شکل ۲: مراحل انجام تحقیق

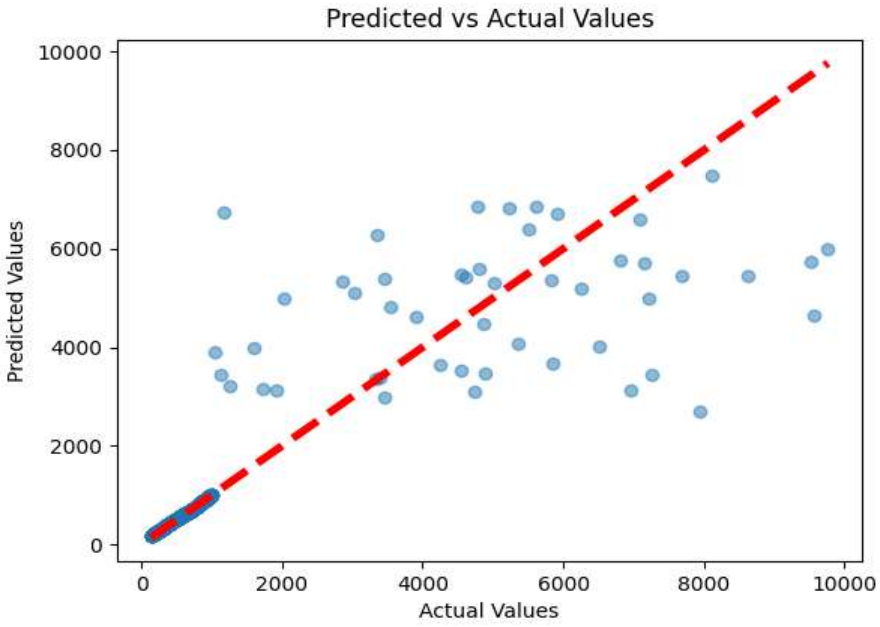
تجزیه و تحلیل یافته ها

در این به تجزیه و تحلیل یافته ها و پیاده سازی الگوریتمهای یادگیری ماشین به منظور پیش بینی مصرف انرژی و سپس تحلیل حساسیت پارامترهای اثرگذار بر مصرف انرژی پرداخته می شود ابتدا نتایج حاصل از الگوریتمها به تفکیک شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه ارائه شده و سپس مقایسه سه الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون خطی چندانه صورت می گیرد. در ابتدا نتیجه حاصل از شبکه عصبی مصنوعی ارائه می شود.



شکل ۳: نمودار خطای شبکه عصبی مصنوعی

همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می شود در تکرار ۱۰ ام به بعد شاهد مسطح شدن نمودار خطا می باشیم ضمن اینکه نمودار خطا از ابتدا دارای عملکرد نزولی می باشد و این نشانگر اثر تکاملی شبکه عصبی مصنوعی بر کاهش خطا می باشد. این امر نشان می دهد که شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی مصرف انرژی عملکرد درستی داشته است

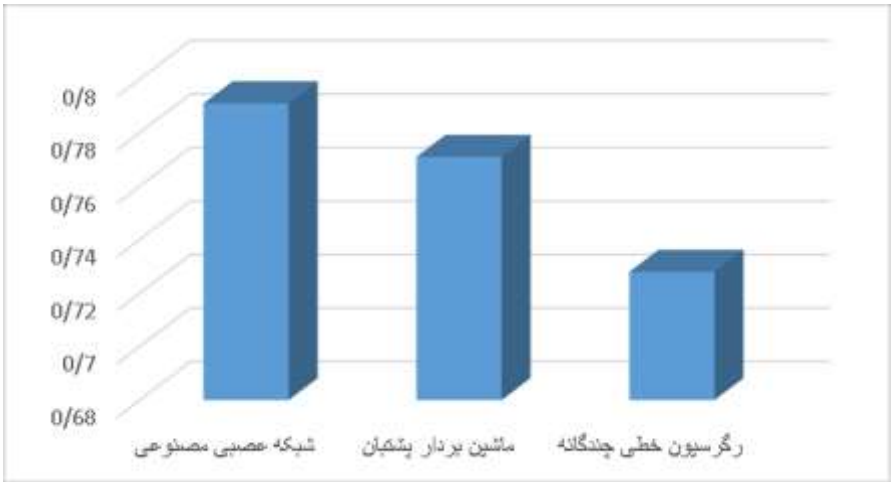


شکل ۴: نمودار تطابق رگرسیون چندگانه

در شکل ۴ مطابق با فرمول ۳ مشاهده می شود که وضعیت پراکندگی داده های پیش بینی شده وواقعی به چه صورت می باشد که این نمودار منجر به دستیابی به مقدار دقت خطا شده است. مشاهده می شود که پراکندگی اندکی حول خط رگرسیون وجود داشته ولذا تطابق بالایی در مدل رگرسیون چندگانه پیاده سازی شده مشاهده می شود. در ادامه به مقایسه عملکرد سه الگوریتم در قالب جدول و نمودار ذیل پرداخته می شود.

جدول ۳: مقایسه الگوریتمها از نظر دقت و خطا

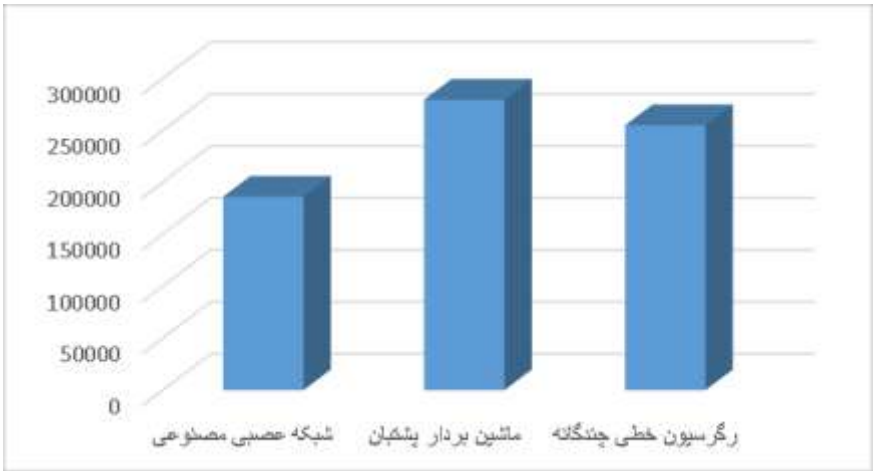
الگوریتمها	دقت	خطا
شبکه عصبی مصنوعی	0.791	186065
ماشین بردار پشتبان	0.771	279277
رگرسیون خطی چندگانه	0.728	254775



شکل ۵: مقایسه الگوریتمها از نظر دقت

همانگونه که در شکل ۵ دیده می شود بیشترین میزان دقت مربوط به الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی با مقدار ۰,۷۹ می باشد در حالیکه پس از ان الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با ۰,۷۷ و سپس الگوریتم رگرسیون خطی چندگانه با ۰,۷۲ بیشترین میزان دقت را بدست اورده اند این رقم نشان می دهد که به عنوان مثال در شبکه عصبی ۷۹ درصد مصرف انرژی از ۶ متغیر مورد نظر در شبکه زنجیره تامین چرخشی پیشنهادی می باشد به عبارت دیگر این متغیرها تا ۷۹ درصد قادر به پیش بینی مصرف انرژی بوده و سایر متغیرها می توانند ۲۱ درصد دیگر را پیش بینی نمایند.

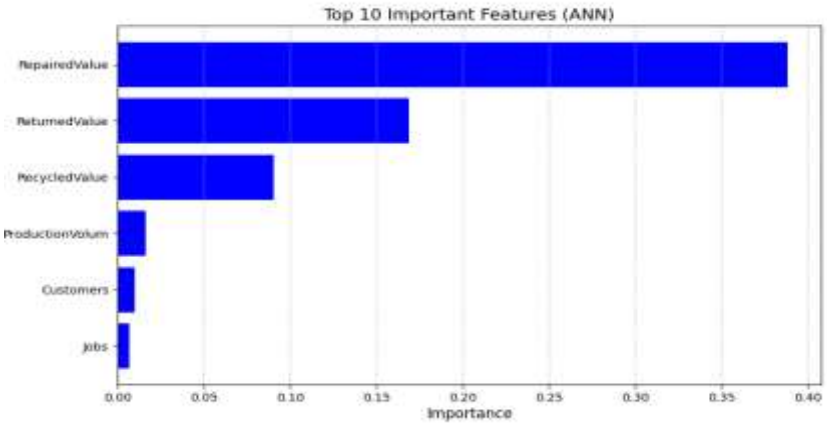
در شبکه عصبی با تفکیک داده ها به داده های اموزش، تست و اعتبار سنجی به ترتیب ۷۰ درصد، ۱۵ درصد و ۱۵ درصد تقسیم بندی داده ها انجام شده و تعداد نرونها به تعدادمتغیرهای ورودی به میزان ۶ نرون تعیین شد ضمن اینکه به دلیل ماهیت رگرسیونی پیش بینی در تحقیق حاضر ۱ نرون به ازای لایه خروجی تعیین گردید و تعداد نرونهای مخفی کمتر از ۲ برابر لایه های ورودی به میزان ۱۱ نرون تعیین شد. شبکه عصبی با ویژگیهای مزبور منجر به بالاترین دقت در بین الگوریتمهای پیاده سازی شده گردید.



شکل ۶ : مقایسه الگوریتمها از نظر خطا

در شکل ۶ مشاهده می شود که از نظر خطا الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی دارای کمترین خطا بوده و پس از ان رگرسیون خطی چندگانه و سپس ماشین بردار پشتیبان قرار دارند. بنابراین در این نمودار رگرسیون خطی چندگانه خطایی کمتر نسبت به ماشین بردار پشتیبان دارد از سوی دیگر همچنان مشاهده می شود که از نظر خطا نیز الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی در قیاس با الگوریتمهای دیگر دارای برتری محسوسی می باشد.

پس از تعیین بهترین الگوریتم در تحقیق حاضر که الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی می باشد در ادامه باید مشخص شود که کدام متغیرها دارای اثر بیشتری بر مصرف انرژی در بین ۶ متغیر انتخابی دارند برای این منظور از نمودار رتبه بندی ویژگیها استفاده می شود که البته به دلیل برتری عملکرد الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی این الگوریتم معیار نتایج می باشد در نمودار ذیل این نتایج ارائه شده است.

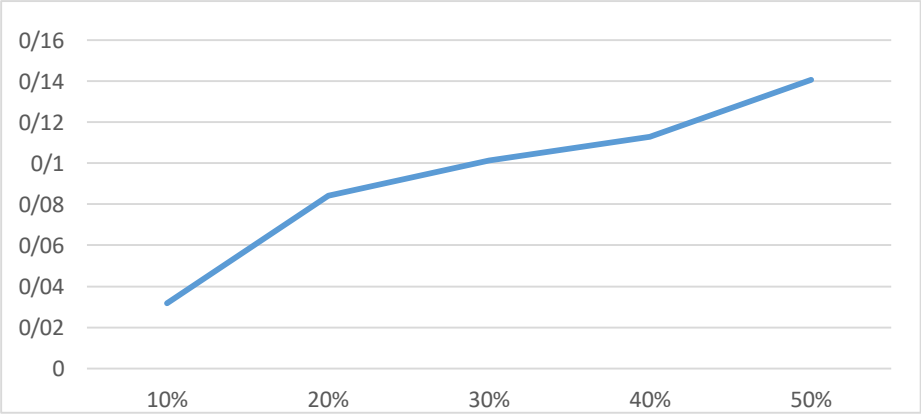


شکل ۷: مقایسه الگوریتمها از نظر خطا

در شکل ۷ مشاهده می شود که حجم کالای تعمیری بیش از سایر ویژگیها بر مصرف انرژی اثرگذار می باشد پس از آن حجم کالای بازگشتی و سپس حجم کالای بازیافتی قرار دارد دو ویژگی اخر که دارای کمترین اثرگذاری می باشند تعداد مشتریان و تعداد افراد شاغل می باشد بنابراین بر اساس نمودار فوق می توان دریافت کدام عوامل دارای اثر بیشتری بوده و لذا اقدامات مدیریتی در جهت کاهش اثر آنها در شبکه زنجیره تامین چرخشی پایدار می بایست صورت گیرد اما به منظور بررسی دقیقتر اثر عوامل از رویکرد تحلیل حساسیت استفاده می شود به این صورت که با افزایش حجم هر یک از پارامترها و سنجش اثر ان بر میزان مصرف انرژی این نکته بررسی می شود که کدامیک دارای اثر بیشتری هستند به منظور اعتبار سنجی الگوریتمها از اعتبارسنجی متقاطع k-fold استفاده می شود.در این روش ، دیتاست به k شکل مختلف تقسیم می‌شود که به هرکدام یک fold گفته می شود .مدل k بار روی این k fold آموزش داده می‌شود .به این صورت k دقت به دست آمده و در نهایت میانگین این دقت‌ها محاسبه می‌شود. نتایج در جداول ذیل ارائه گردیده است.

جدول ۴: تحلیل حساسیت حجم تولید محصولات

حجم تولید محصولات	میزان مصرف انرژی	درصد تغییر در مصرف انرژی
0%	5361	
10%	5532	0.031897
20%	5997	0.084056
30%	6605	0.101384
40%	7350	0.112793
50%	8384	0.14068

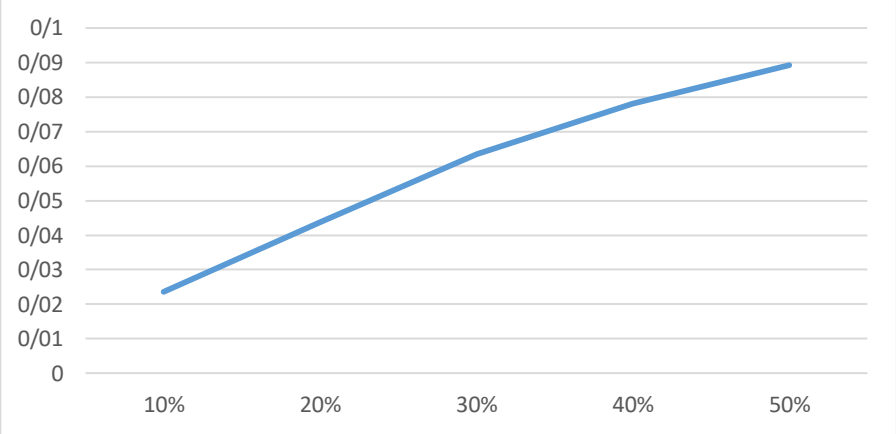


شکل ۸: تحلیل حساسیت حجم تولید محصولات

در شکل ۸ مشاهده می شود با افزایش حجم تولید محصولات انتظار می رود مصرف انرژی تا ۱۴ درصد افزایش یابد به عبارت دیگر افزایش ۵۰ درصدی حجم تولید محصولات اثر ۱۴ درصدی بر مصرف انرژی در زنجیره تامین چرخشی پایدار برجای خواهد گذارد.

جدول ۵: تحلیل حساسیت تعداد مشتریان

تعداد مشتریان	میزان مصرف انرژی	درصد تغییر در مصرف انرژی
0%	5361	
10%	5488	0.02369
20%	5728	0.043732
30%	6091	0.063373
40%	6567	0.078148
50%	7153	0.089234

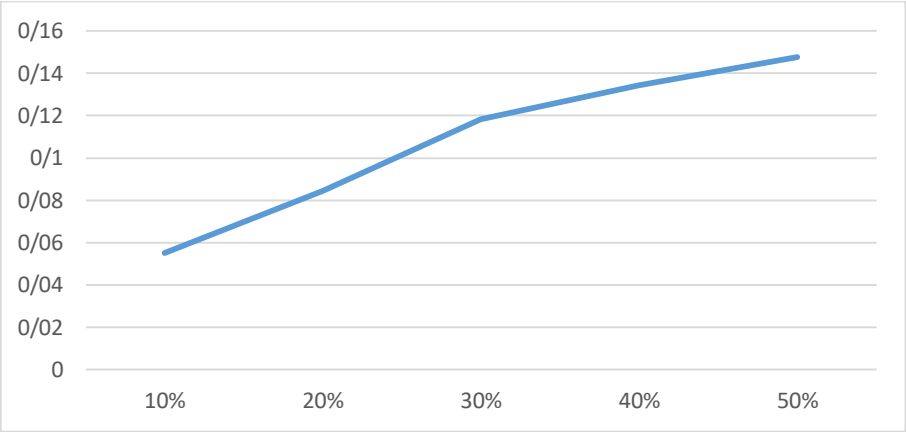


شکل ۹ : تحلیل حساسیت تعداد مشتریان

در شکل ۹ شاهد اثر خطی تعداد مشتریان بر مصرف انرژی می باشیم همانگونه که مشاهده می شود با افزایش تعداد مشتریان تا ۵۰ درصد انتظار می رود مصرف انرژی تا ۹ درصد در زنجیره تامین چرخشی پایدار افزایش یابد.

جدول ۶ تحلیل حساسیت میزان محصولات بازگشتی

میزان محصولات بازگشتی	میزان مصرف انرژی	میزان تغییر در مصرف انرژی
0%	5361	
10%	5656	0.055027
20%	6134	0.084512
30%	6860	0.118357
40%	7781	0.134257
50%	8929	0.147539

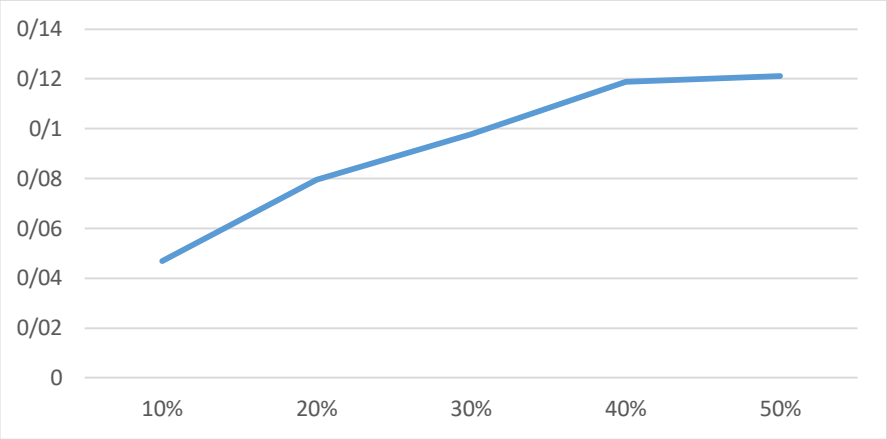


شکل ۱۰: تحلیل حساسیت میزان محصولات بازگشتی

در شکل ۱۰ می توان مشاهده کرد با افزایش میزان محصولات بازگشتی تا ۵۰ درصد انتظار می رود میزان مصرف انرژی تا ۱۵ درصد افزایش یابد.

جدول ۷ تحلیل حساسیت حجم محصولات بازیافتی

حجم محصولات بازیافتی	میزان مصرف انرژی	میزان تغییر در مصرف انرژی
0%	5361	
10%	5613	0.047006
20%	6060	0.079637
30%	6653	0.097855
40%	7444	0.118894
50%	8346	0.121171

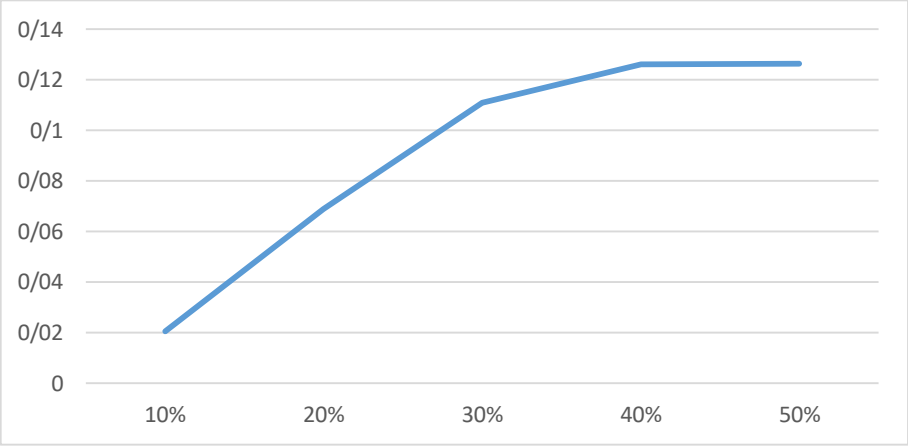


شکل ۱۱: تحلیل حساسیت حجم محصولات بازیافتی

در شکل ۱۱ مشاهده می شود افزایش حجم محصولات بازیافتی تا ۵۰ درصد می تواند مصرف انرژی را تا ۱۲ درصد افزایش دهد ضمن اینکه افزایش ۴۰ درصدی نیز همین اثر را بر مصرف انرژی دارد بنابراین بین افزایش ۴۰ و ۵۰ درصدی تفاوتی مشاهده نمی شود.

جدول ۸: تحلیل حساسیت حجم محصولات تعمیری

حجم محصولات تعمیری	میزان مصرف انرژی	میزان تغییر در مصرف انرژی
0%	5361	
10%	5470	0.020332
20%	5846	0.068739
30%	6494	0.110845
40%	7314	0.12627
50%	8239	0.12647

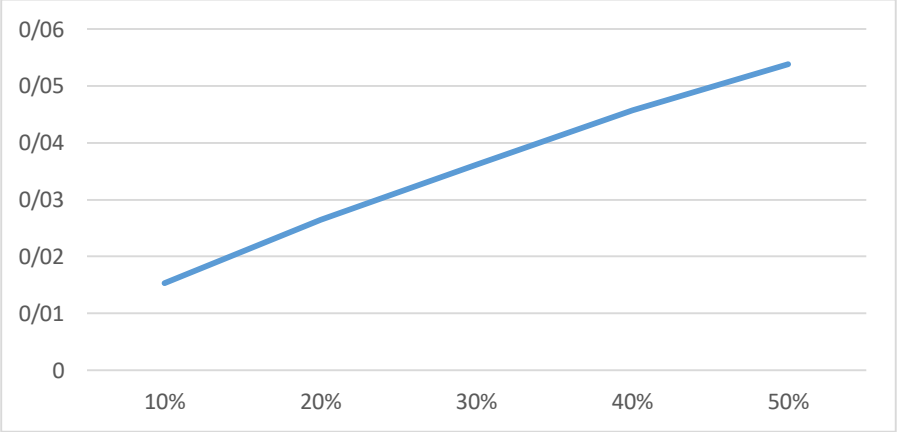


شکل ۱۲: تحلیل حساسیت حجم محصولات تعمیری

در شکل ۱۲ مشاهده می شود که روند اثرگذاری محصولات تعمیری بر مصرف انرژی از نوع افزایش با شیب تند اولیه و سپس کاهش در افزایش می یابد و به سمت تسطیح حرکت می کند افزایش ۵۰ درصدی در حجم محصولات تعمیری می تواند تا بیش از ۱۲ درصد منجر به افزایش مصرف انرژی در زنجیره تامین چرخشی پایدار گردد.

جدول ۹: تحلیل حساسیت اشتغال

کل افراد مشغول به کار در زنجیره تامین	میزان مصرف انرژی	میزان تغییر در مصرف انرژی
0%	5361	
10%	5443	0.015296
20%	5587	0.026456
30%	5789	0.036155
40%	6054	0.045776
50%	6380	0.053849

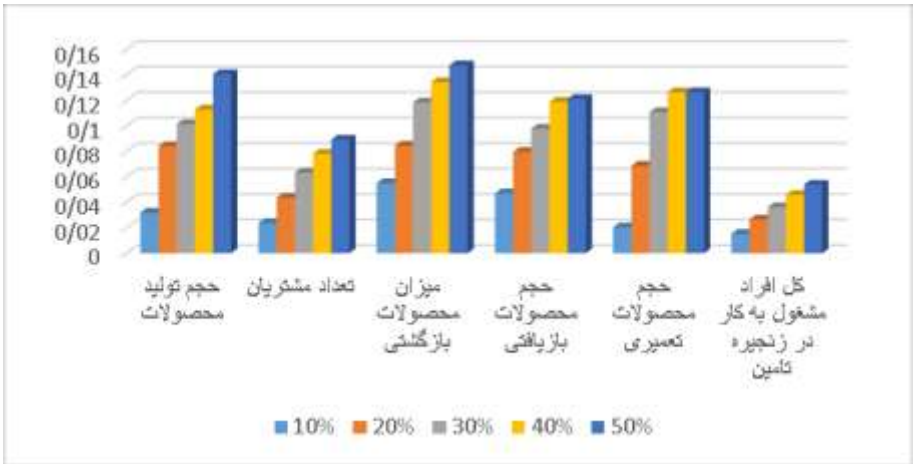


شکل ۱۳:تحلیل حساسیت اشتغال

در شکل ۱۳ شاهد اثر خطی اشتغال بر میزان مصرف انرژی می باشیم به گونه ای که افزایش ۵۰ درصدی در اشتغال نیروی کار می تواند صرفا تا اندکی بیش از ۵ درصد منجر به افزایش مصرف انرژی شود که اثری ناچیز را نسبت به متغیرهای ورودی دیگر نشان می دهد در ادامه مقایسه اثرگذاری متغیرهای ورودی بر مصرف انرژی صورت می گیرد.

جدول ۱۰: مقایسه متغیرهای ورودی اثرگذار بر مصرف انرژی

	حجم تولید محصولات	تعداد مشتریان	میزان محصولات بازگشتی	حجم محصولات بازیافتی	حجم محصولات تعمیری	کل افراد مشغول به کار در زنجیره تامین
10%	0.031897	0.02369	0.055027	0.047006	0.020332	0.015296
20%	0.084056	0.043732	0.084512	0.079637	0.068739	0.026456
30%	0.101384	0.063373	0.118357	0.097855	0.110845	0.036155
40%	0.112793	0.078148	0.134257	0.118894	0.12627	0.045776
50%	0.14068	0.089234	0.147539	0.121171	0.12647	0.053849



شکل ۱۴: مقایسه متغیرهای ورودی اثرگذار بر مصرف انرژی

همانگونه که در شکل ۱۴ مشاهده می شود میزان محصولات بازگشتی دارای بیشترین اثر بر مصرف انرژی می باشند به گونه ای که نتایج تحلیل حساسیت گویای این نکته است که انتظار می رود افزایش ۱۰ درصدی در این متغیر منجر به افزایش مصرف انرژی تا بیش از ۱۴ درصد شود رتبه بعدی از ان حجم تولید محصولات و سپس حجم محصولات تعمیری و بازیافتی تقریبا یک اثرگذاری مشابه را نشان می دهند رتبه ۵ ام متعلق به تعداد مشتریان بوده و رتبه نهایی مربوط به افراد شاغل در زنجیره تامین چرخشی پایدار می باشد.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به پیش بینی مصرف انرژی در زنجیره تامین چرخشی پایدار با استفاده از الگوریتمهای یادگیری ماشین پرداخته شد. در این تحقیق یک مدل یادگیری ماشین طراحی شد که شامل ۶ متغیر ورودی تعداد مشتریان، حجم کالای تولیدی، حجم کالای بازگشتی،

حجم کالای تعمیری و حجم کالای بازیافتی و نیروهای شاغل بودند. متغیرهای حجم کالای تولیدی و مشتریان بیشتر در ارتباط با زنجیره های تامین مستقیم قابل تحلیل هستند در حالیکه حجم کالای بازگشتی تعمیری و بازیافتی مربوط به زنجیره تامین چرخشی و نیروی شاغل به عنوان رکن سوم پایداری یعنی مسئولیت اجتماعی در نظر گرفته شد. نتایج حل مدل با استفاده از الگوریتمهای یادگیری ماشین و مشخصا شبکه عصبی مصنوعی که کمترین خطا و بیشترین دقت را بدست اورده است نشان می دهد ۷۹ درصد مصرف انرژی بر اساس ۶ متغیر ورودی مزبور قابل تحلیل بوده و این متغیرها تا ۷۹ درصد می توانند باعث افزایش مصرف انرژی شوند ضمن اینکه نتایج تحلیل حساسیت گویای این نکته است که افزایش این متغیرها تا ۵۰ درصد می تواند باعث افزایش مصرف انرژی شود اما میزان اثرگذاری هر متغیر با متغیر دیگر تفاوت دارد. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت می توان گفت محصولات بازگشتی دارای بیشترین اثرگذاری و پس از ان محصولات تولیدی می باشد بنابراین متغیر مربوط به زنجیره تامین چرخشی اثرگذاری بیشتری نسبت به متغیر مربوط به زنجیره تامین مستقیم داراست. پس از ان حجم محصولات تعمیری و سپس حجم محصولات بازیافتی با فاصله اندک نسبت به هم قرار دارند کم اثرترین متغیر متغیری اشتغال است که نمی توان اثر چندانی برای آن قائل شد.

در تحقیق حاضر برای نخستین بار مدل پیش بینی مصرف انرژی در زنجیره تامین چرخشی و پایدار به صورت توامان بر اساس الگوریتم های یادگیری ماشین ارائه شده است که با توجه به اینده این زنجیره تامین و نگاه رو به جلو در جهت تحقق این زنجیره تامین، اهداف حاصل از تحقیق حاضر با تمرکز بر پیش بینی مصرف انرژی می تواند برای مدیران زنجیره های تامین سودمند باشد. ضمن اینکه تحقیق آتی می تواند نمونه چنین پیش بینی را در خصوص زنجیره های تامین چرخشی سبز یا تاب اور انجام داده یا سایر اهداف نظیر اشتغال در زنجیره تامین پایدار مورد پیش بینی قرار گیرد.

منابع:

Liu T, Guan ,X, Wang Z, Qin T, Sun R, Wang,Y Optimizing green supply chain circular economy in smart cities with integrated machine learning technology, Heliyon 10 (2024) e29825

Alijoyo,F,A AI-powered deep learning for sustainable industry 4.0 and internet of things: Enhancing energy management in smart buildings, Alexandria Engineering Journal 104 (2024) 409–422

Yang, X.; Wang, Z.; Zhang, H.; Ma, N.; Yang, N.; Liu, H.; Zhang, H.; Yang, L. A Review: Machine Learning for Combinatorial Optimization Problems in Energy Areas. Algorithms 2022, 15, 205. https://doi.org/10.3390/a15060205

Zhu ,J, Wu ,Y Liu ,Z Costa,C Sustainable Optimization in Supply Chain Management Using Machine Learning, International Journal of Management Science Research, Vol.8, Issue 1, (Jan) ISSN 2536-6

Cerqueira-Streit, J.A.; Endo, G.Y.; Guarnieri, P.; Batista, L. Sustainable Supply Chain Management in the Route for a Circular Economy: An Integrative Literature Review. Logistics 2021, 5, 81. https://doi.org/10.3390/ logistics5040081

Alzoubi,A MACHINE LEARNING FOR INTELLIGENT ENERGYCONSUMPTION IN SMART HOMES, International Journal of Computations, Information and Manufacturing (IJCIM), Vol.2, Issue.1, 2022

Onukwulu ,E,C, Agho M,O and Eyo-Udo,N,L Developing a framework for AI-driven optimization of supply chains in energy sector, Global Journal of Advanced Research and Reviews, 2023, 01(02), 082-0101

Jampani,S, Avancha,S Mangal,A, , Machine Learning Algorithms for Supply Chain Optimisation, International Journal of Research in Modern Engineering and Emerging Technology (IJRMEET) Vol.11 | Issue-4 | April-2023| ISSN: 2320-6586

. Pereraa, P.U., Vahid Nikb,W, Scartezzini,J,J, Machine learning methods to assist energy system optimization, Applied Energy · June 2019

Barrie ,I Agupugo ,CH,P, Iguare ,H,O and Folarin,A Leveraging machine learning to optimize renewable energy integration in developing economies, Global Journal of Engineering and Technology Advances, 2024, 20(03), 080–093

Malhotra,G Impact of circular economy practices on supply chain capability, flexibility and sustainable supply chain performance, The International Journal of Logistics Management © Emerald Publishing Limited 0957-4093 DOI 10.1108/IJLM-01-2023-0019

Rao, H.; Li, J.; Sun, X. Demand Forecasting and Allocation Optimization of Green Power Grid Supply Chain Based on Machine Learning Algorithm: A Study Based on the Whole-Process Data of Power Grid Materials. Sustainability 2025, 17, 1247. https://doi.org/10.3390/ su17031247

Mahmood1,SH Sun,H, Alhussan3,,A,AAsifa Iqbal4 & El-Sayed M. El-kenawy, Active learning-based machine learning approach for enhancing environmental sustainability in green building energy consumption, Scientifc Reports | (2024) 14:19894 | https://doi.org/10.1038/s41598-024-70729-4

Duan,Y · Khokhar,M · · Anshuman Sharma,A,R · Tahir Islam, The role of digital technology and environmental sustainability in circular supply chains based on the fuzzy TOPSIS model, Environment, Development and Sustainability https://doi.org/10.1007/s10668-024-05924-4

BAGWARI A, (Senior Member, IEEE), , An Enhanced Energy Optimization Modelfor Industrial Wireless Sensor Networks Using Machine Learning, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2023.3311854

Afroozi,M,A Gramifar,M| azratifar,B Keshvari4 M,M Razavian,S,B,, Optimization of Lithium-Ion Battery Circular Economy in Electric Vehicles in Sustainable Supply Chain, Battery Energy, 2025; 4:e20240057

Liu, J.; Chen, J. Applications and Trends of Machine Learning in Building Energy Optimization: A Bibliometric Analysis. Buildings 2025, 15, 994. https://doi.org/10.3390/ buildings15070994

Theeraworawit, M.; Suriyankietkaew, S.; Hallinger, P. Sustainable Supply Chain Management in a Circular Economy: A Bibliometric Review. Sustainability 2022, 14, 9304. https://doi.org/ 10.3390/su14159304

de la Torre, R.; Onggo, B.S.; Corlu, C.G.; Nogal, M.; Juan, A.A. The Role of Simulation and Serious Games in Teaching Concepts on Circular Economy and Sustainable Energy. Energies 2021, 14, 1138. https://doi.org/10.3390/en14041138

Joshan. Advanced Machine Learning Techniques for Smart Grid Optimization and Energy Management. J. Eng. Ind. Res. 2025, 6 (2):142-156

Han CH, Zhang, Q,Optimization of supply chain efficiency management based on machine learning and neural network, Neural Computing and Applications https://doi.org/10.1007/s00521-020-05023-1

Liu Z, Xu SH Shihao Zhao a, Yuewen Li b, Meiling Zhou a, Shuosen Li b, Fei Meng, Clean energy supply chain optimization: Steady-state natural gas transportation, Cleaner Logistics and Supply Chain 15 (2025) 100214

JAMIL ,F IQBAL , N,IMRAN , AHMAD ,SH, Peer-to-Peer Energy Trading Mechanism Based on Blockchain and Machine Learning for Sustainable Electrical Power Supply in Smart Grid, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2021.3060457