E-ISSN: 2676-6159 | P-ISSN: 2538-5079

Journal of Decisions and Operations Research

www.journal-dmor.ir

J. Decis. Oper. Res. Vol. 8, No. 2 (2023) 463–477.

Paper Type: Original Article

A Game-Theoretic Approach to Set Prices Concerning a Product Manufactured from Plastic Waste

Hamed Jafari*

Department of Industrial Engineering, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran; hamed.jafari@iut.ac.ir.

Citation:

Jafari, H. (2023). A game-theoretic approach to set prices concerning a product manufactured from plastic waste. *Journal of decisions and operations research, 8*(2), 463-477.

Received: 08/02/2022 Reviewed: 11/03/2022 Revised: 14/05/2022 Accepted: 21/06/2022

Abstract

Purpose: The purpose of this paper is to consider products such as disposable tableware produced from plastic waste. In this setting, plastic waste is collected, recycled, and reused. In this research, a supply chain including waste depot, recycler, and manufacturer is considered in which plastic waste is reused in order to manufacture a product. Under this supply chain, the waste depot collects non-recycled plastic waste and the recycler recycles it. Then, the manufacturer uses recycled plastic waste to produce final product and meet customer demand. In this structure, the waste depot, recycler, and manufacturer set the price of non-recycled plastic waste, the price of recycled plastic waste, and the price of final product, respectively.

Methodology: The game theory is used to make the decisions under the considered supply chain. It is assumed that the decision power of the manufacturer is more than of the waste depot and recycler. In this setting, Stackelberg game-theoretic model is established in order to specify the prices adopted by the members.

Findings: Results indicate that decision powers of the waste depot and recycler have no effect on the price and demand of final product. The profits allocated to the manufacturer are the same when decision powers of the waste depot and recycler are different. Moreover, more the price elasticity of the demand for final product leads to lower profits for the members.

Originality/Value: Using plastic waste is an effective approach to sustain environment and reduce pollution. In this research, plastic waste is used to produce products such as disposable tableware in a supply chain including manufacturer, recycler and waste depot. The game theory approach is also used to make decisions. To our knowledge, the idea of applying the game theory to use plastic waste in production of products under the considered supply chain has been raised for the first time in the literature.

Keywords: Supply chain management, Pricing, Decision-making, Game theory, Recycling.

Corresponding Author: hamed.jafari@iut.ac.ir
http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1402.8.2.10.4
Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Journal of Decisions and Operations Research

تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

دوره ۸، شماره (۲)، (۱۴۰۲)، ۴۷۷-۴۶۳

www.journal-dmor.ir

نوع مقاله: پژوهشی

رویکرد نظریه بازی برای قیمت‌گذاری یک محصول ساخته‌شده از ضایعات پلاستیکی

حامد جعفری*

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران.

چکیده

هدف: محصولاتی از قبیل ظروف یک‌بارمصرف را درنظر بگیرید که برای تولید آن‌ها از ضایعات پلاستیکی استفاده می‌شود. برای تولید چنین محصولاتی ابتدا ضایعات پلاستیکی جمع‌آوری و بازیافت شده و سپس مورداستفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق زنجیره‌تامینی شامل انبار ضایعات، بازیافت‌کننده و تولیدکننده درنظر گرفته شده که در آن از ضایعات پلاستیکی به‌عنوان مواد اولیه موردنیاز برای تولید یک محصول استفاده می‌شود. تحت زنجیره‌تامین مذکور انبار ضایعات، ضایعات پلاستیکی موردنیاز را به‌صورت بازیافت‌نشده جمع‌آوری نموده و بازیافت‌کننده آن‌ها را بازیافت می‌کند. سپس تولیدکننده با استفاده از ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده، محصول نهایی را تولید و تقاضای مشتریان را برآورده می‌نماید. در این ساختار انبار ضایعات قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده، بازیافت‌کننده قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده و تولیدکننده قیمت محصول نهایی را تعیین می‌کنند.

روش‌شناسی پژوهش: با استفاده از رویکرد نظریه بازی، تصمیمات مطرح‌شده تحت زنجیره‌تامین موردبررسی اتخاذ می‌شوند. فرض می‌گردد که قدرت تصمیم‌گیری تولیدکننده بیش‌تر از انبار ضایعات و بازیافت‌کننده است. به همین منظور از یک بازی استکلبرگ که در آن تولیدکننده رهبر و انبار ضایعات و بازیافت‌کننده پیرو تصمیمات تولیدکننده هستند، برای قیمت‌گذاری ضایعات پلاستیکی و محصول نهایی استفاده می‌شود.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهند که قدرت‌های تصمیم‌گیری انبار ضایعات و بازیافت‌کننده تاثیری بر روی قیمت و تقاضای محصول نهایی ندارند. سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده در حالت‌هایی که انبار ضایعات و بازیافت‌کننده دارای قدرت‌های تصمیم‌گیری متفاوتی هستند، یکسان بوده و این مقدار بیش‌تر از حالتی است که آن‌ها قدرت‌های تصمیم‌گیری مشابهی دارند. هم‌چنین، هرچقدر تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن حساس‌تر باشد، سود اعضا کم‌تر خواهد بود.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: استفاده از ضایعات پلاستیکی در تولید محصولات، رویکردی موثر برای توسعه پایداری و کاهش آلودگی محیط‌زیست است. در این تحقیق از ضایعات پلاستیکی برای تولید محصولاتی از قبیل ظروف یک‌بارمصرف در زنجیره‌تامینی شامل تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات استفاده می‌شود. هم‌چنین برای اتخاذ تصمیمات رویکرد نظریه بازی به‌کار گرفته می‌شود. می‌توان گفت که در تحقیق فعلی ایده استفاده از رویکرد نظریه بازی برای استفاده از ضایعات پلاستیکی در تولید محصولات تحت زنجیره‌تامین موردبررسی، برای اولین بار در ادبیات موضوع مساله مطرح شده است.

کلیدواژه‌ها: بازیافت ضایعات، تصمیم‌گیری، قیمت‌گذاری، مدیریت زنجیره‌تامین، نظریه بازی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مدیریت ضایعات و استفاده از آن‌ها در تولید محصولات توجه بسیاری از محققان و دانشگاهیان را به خود جلب نموده است [3]-[1]. بر این اساس اخیرا رویکردهای مختلفی از قبیل پایداری و توسعه پایدار، تولید سبز، استفاده مجدد از مواد ضایعاتی، تولید مجدد و بازیافت به‌منظور مدیریت ضایعات توسعه داده شده‌اند [6]-[4]. در این میان می‌توان گفت که بازیافت ضایعات یک رویکرد موثر

* نویسنده مسئول

hamed.jafari@iut.ac.ir

http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1402.8.2.10.4

برای استفاده کارا از این مواد است [7]، [8]. از طریق بازیافت ضایعات می‌توان بخشی از کمبود ایجادشده در انرژی‌های تجدیدناپذیر را که به دلیل مصرف بی‌رویه این مواد ایجاد شده است، جبران نمود [9]، [10]. این رویکرد منجر به توسعه پایداری و کاهش آلودگی محیط‌زیست می‌گردد [13]–[11]. ضایعات پلاستیکی بخش قابل‌توجهی از مواد ضایعاتی را تشکیل می‌دهند [14]، [15]. بر این اساس جمع‌آوری ضایعات پلاستیکی، بازیافت آن‌ها و استفاده از چنین موادی برای تولید محصولات مختلف می‌توانند به منجر به بهبود پایداری محیط و کاهش آلایندگی گردند [18]–[16].

نظریه بازی یک رویکرد ریاضی به‌منظور تصمیم‌گیری در شرایطی است که تصمیم یک فرد وابسته به تصمیم افراد دیگر باشد [19]، [20]. درواقع در شرایط رقابتی و یا همکارانه که تعدادی تصمیم‌گیرنده با اهداف متعارض سعی بر آن دارند تصمیمات خود را به‌صورت هم‌زمان و یا متوالی و با قدرت تصمیم‌گیری یکسان و یا متفاوت اتخاذ کنند، استفاده از این رویکرد نتایج قابل قبولی را به همراه خواهد داشت –[21] [23]. در سال‌های اخیر رویکرد نظریه بازی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای برای اتخاذ تصمیمات در ساختارهای مختلف زنجیره‌تامین به‌کار گرفته‌شده و تحقیقات فراوانی نیز در این زمینه انجام شده‌اند [24]. با این‌وجود تعداد اندکی از مطالعات از این رویکرد برای اتخاذ تصمیمات در زنجیره‌تامین محصولات بازیافت‌پذیر و یا تولید محصولات حاصل از مواد ضایعاتی استفاده نموده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

چن و همکاران [25] زنجیره‌تامین بازیافت کاغذ را در تایوان موردبررسی قرار داده‌اند. آن‌ها برای بهبود تصمیمات مربوط به بازیافت‌پذیری این محصول از رویکرد نظریه بازی استفاده نموده‌اند. نتایج حاصل از کار آن‌ها نشان می‌دهند که جداسازی کاغذ قبل از بازیافت آن تاثیر به‌سزایی در کیفیت محصولات تولیدشده از ضایعات کاغذی خواهد داشت. شیو و چن [26] تاثیر حمایت‌های مالی دولت را بر روی رقابت میان تامین‌کننده و تولیدکننده یک محصول ساخته‌شده از مواد ضایعاتی با استفاده از رویکرد نظریه بازی تحت بازی نش بررسی نموده‌اند. آن‌ها دریافتند که حمایت‌های انگیزشی دولت منجر به افزایش مواد ضایعاتی مورداستفاده در تولید محصولات خواهد شد. هم‌چنین تعیین قیمت‌های کم‌تر سودهای بیش‌تری را برای اعضای زنجیره به همراه دارد. دونگ و همکاران [27] رقابت میان دو محصول تولیدشده از ضایعات بازیافت‌پذیر را تحت زنجیره‌تامینی شامل یک بازیافت‌کننده و دو تولیدکننده موردبررسی قرار داده‌اند. در این ساختار یکی از تولیدکننده‌ها از حمایت مالی دولت برخوردار شده و دیگری به‌صورت مستقل فعالیت می‌نماید. نتایج حاکی از آن هستند که تولیدکننده اول به‌واسطه حمایت‌های دولتی سود بیش‌تری کسب نموده و از مواد ضایعاتی بیش‌تری نیز در تولید محصولات خود استفاده نموده است. ناگورنی و وولی [28]، ناگورنی و تویاساکی [29] و کریگر و همکاران [30] مبحث مدیریت ضایعات الکترونیکی را تحت زنجیره‌تامینی شامل انبار ضایعات الکترونیکی، بازیافت‌کننده و پردازنده درنظر گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که سود اعضای زنجیره تحت شرایط همکارانه به‌مراتب بیش‌تر از شرایط رقابتی است؛ هم‌چنین انرژی و هزینه صرف شده برای تولید محصولات الکترونیکی حاصل از مواد ضایعاتی به‌مراتب کم‌تر از مقادیر متناظر برای تولید محصولات حاصل از مواد اولیه ویرجین هستند. هم‌چنین لیو و همکاران [31] قیمت‌گذاری یک محصول بازیافت‌پذیر را در زنجیره‌تامینی شامل یک تولیدکننده و یک جمع‌آوری‌کننده که محصولات مصرف‌شده را جمع‌آوری می‌نماید، درنظر گرفته‌اند. آن‌ها تصمیمات موردبررسی را تحت شرایط رقابتی و همکارانه موردبررسی قرار داده و نشان می‌دهند که همکاری میان اعضا لزوما سود بیش‌تری را برای آن‌ها به همراه نخواهد داشت.

استفاده از ضایعات پلاستیکی در تولید محصولات، رویکردی موثر برای توسعه پایداری و کاهش آلودگی محیط‌زیست است. در این تحقیق از ضایعات پلاستیکی برای تولید محصولاتی از قبیل ظروف یک‌بارمصرف در زنجیره‌تامینی شامل تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات استفاده می‌شود. در این ساختار انبار ضایعات، ضایعات پلاستیکی موردنیاز را به‌صورت بازیافت‌نشده جمع‌آوری نموده و بازیافت‌کننده آن‌ها را بازیافت می‌کند. هم‌چنین تولیدکننده با استفاده از ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده، محصول نهایی را تولید نموده و به مشتریان تحویل می‌دهد. هم‌چنین برای اتخاذ تصمیمات، رویکرد نظریه بازی به‌کار گرفته می‌شود.

جزییات مربوط به مقاله‌های مرور شده و مقایسه مطالعه فعلی با این مقالات در **جدول ۱** خلاصه شده‌اند. می‌توان گفت که در تحقیق فعلی ایده استفاده از رویکرد نظریه بازی برای استفاده از ضایعات پلاستیکی در تولید محصولات تحت زنجیره‌تامین موردبررسی، برای اولین بار در ادبیات موضوع مساله مطرح شده است.

جدول ۱- جزییات مربوط به مقالات مرور شده.

Table 1- Details of the reviewed papers.

نویسندگان مقاله	اعضای زنجیره‌تامین موردبررسی	محصول موردبررسی	تصمیمات موردبررسی	بازی موردبررسی
چن و همکاران [25]	بازیافت‌کننده و تولیدکننده	ضایعات کاغذی	قیمت‌گذاری و بازیافت‌پذیری	رقابتی
شیو و چن [26]	دولت، تامین‌کننده و تولیدکننده	مواد ضایعاتی در حالت کلی	قیمت‌گذاری	رقابتی
دونگ و همکاران [27]	دولت، بازیافت‌کننده و دو تولیدکننده	مواد ضایعاتی در حالت کلی	قیمت‌گذاری	رقابتی
ناگورنی و وولی [28]، ناگورنی و تویاساکی [29]، کریگر و همکاران [30]	انبار ضایعات، بازیافت‌کننده و پردازنده	ضایعات الکترونیکی	قیمت‌گذاری	رقابتی و همکارانه
لیو و همکاران [31]	تولیدکننده و جمع‌آوری‌کننده	مواد ضایعاتی در حالت کلی	قیمت‌گذاری	رقابتی و همکارانه
مطالعه فعلی	انبار ضایعات، بازیافت‌کننده و تولیدکننده	ضایعات پلاستیکی	قیمت‌گذاری	رقابتی

ساختار ادامه مقاله بدین‌صورت است: در بخش ۲ مساله موردبررسی تعریف می‌گردد. در بخش ۳ از رویکرد نظریه بازی برای تصمیم‌گیری استفاده خواهد شد. در بخش ٤ نتایج و یافته‌ها ارایه می‌شوند و درنهایت بخش ۵ مربوط به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی تحقیق انجام شده است.

۲- توصیف مساله

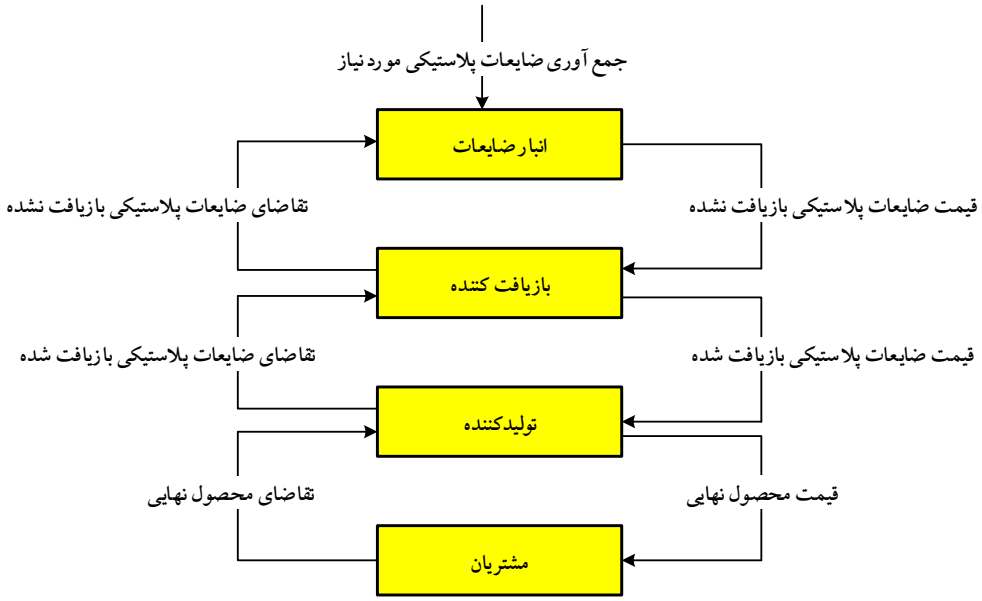
در این بخش جزییات مساله موردبررسی در این تحقیق مشخص می‌گردند.

۲-۱- تعریف مساله

محصولاتی ازجمله ظروف یک‌بارمصرف را درنظر بگیرید که برای تولید آن‌ها از ضایعات پلاستیکی استفاده می‌شود. برای تولید چنین محصولاتی ابتدا باید ضایعات پلاستیکی جمع‌آوری و بازیافت شده و سپس مورداستفاده قرار گیرند. در این تحقیق یک زنجیره‌تامین سه سطحی شامل انبار ضایعات، بازیافت‌کننده و تولیدکننده درنظر گرفته شده است که در آن از ضایعات پلاستیکی به‌عنوان مواد اولیه موردنیاز برای تولید یک محصول استفاده می‌شود. تحت زنجیره‌تامین مذکور، انبار ضایعات، ضایعات پلاستیکی موردنیاز را به‌صورت بازیافت‌نشده جمع‌آوری نموده و بازیافت‌کننده آن‌ها را بازیافت می‌کند. سپس تولیدکننده با استفاده از ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده، محصول نهایی را تولید و تقاضای مشتریان را برآورده می‌نماید.

در چنین شرایطی ابتدا تقاضای محصول نهایی در بازار با توجه به قیمت آن مشخص می‌شود. سپس بر اساس میزان تقاضای مشتریان، مقدار کل ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز تعیین می‌گردد. تولیدکننده این مقدار ضایعات پلاستیکی را از بازیافت‌کننده خریداری می‌نماید. درنهایت با توجه به میزان ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده موردنیاز، مقدار کل ضایعات بازیافت‌نشده موردنیاز نیز مشخص شده و انبار ضایعات می‌بایست این مقدار را جمع‌آوری نماید.

تحت زنجیره‌تامین موردبررسی، تولیدکننده قیمت هر تن از محصول نهایی را برای مشتریان تعیین می‌نماید. بازیافت‌کننده قیمت هر تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده را به تولیدکننده اعلام می‌کند. انبار ضایعات نیز قیمت هر تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده را برای بازیافت‌کننده مشخص می‌کند. با توجه به قیمت‌های تعیین‌شده، تقاضای مشتریان به تولیدکننده برای محصول نهایی، تقاضای تولیدکننده به بازیافت‌کننده برای ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده و تقاضای بازیافت‌کننده به انبار ضایعات برای ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده مشخص خواهند شد. ساختار مساله موردبررسی در **شکل ۱** نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار مساله موردبررسی.

Figure 1– Structure of the considered problem.

۲-۲- فرمول‌بندی مساله

فرض کنید K_1 هزینه تولید هر تن محصول نهایی برای تولیدکننده، K_2 هزینه بازیافت هر تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده برای بازیافت‌کننده و K_3 هزینه جمع‌آوری هر تن ضایعات پلاستیکی برای انبار ضایعات باشند. θ_1 مقدار ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک تن محصول نهایی و θ_2 مقدار ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده موردنیاز برای تولید یک تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده ($\theta_1, \theta_2 > 1$) هستند؛ هم‌چنین a پتانسیل بازار محصول نهایی بوده و b کشسانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن (میزان کاهش تقاضای محصول نهایی به ازای یک واحد افزایش قیمت آن) است.

در این شرایط اعضای زنجیره‌تامین موردبررسی سعی می‌کنند تا تصمیمات خود را اتخاذ نمایند. درواقع تولیدکننده قیمت هر تن محصول نهایی (P_1) را به مشتریان، بازیافت‌کننده قیمت هر تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده (P_2) را به تولیدکننده و انبار ضایعات قیمت هر تن ضایعات پلاستیکی جمع‌آوری‌شده و بازیافت‌نشده (P_3) را به بازیافت‌کننده اعلام می‌کنند.

درنهایت با توجه به قیمت‌های تعیین‌شده، مقدار تقاضای مشتریان به تولیدکننده برای محصول نهایی (Q_1)، مقدار تقاضای تولیدکننده به بازیافت‌کننده برای ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده (Q_2) و مقدار تقاضای بازیافت‌کننده به انبار ضایعات برای ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده (Q_3) تعیین خواهند شد. درواقع با توجه به پارامترها و متغیرهای تعریف‌شده، مقادیر تقاضای محصول نهایی، ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده و ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده به ترتیب با استفاده از **رابطه (۱)** تا **رابطه (۳)** به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:
فرض کنید مقادیر سود تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات به ترتیب با نمادهای Z_1، Z_2 و Z_3 نشان داده شوند.

$$Q_1 = a - bP_1. \quad (۱)$$

$$Q_2 = \theta_1 Q_1 = \theta_1\ a - bP_1). \quad (۲)$$

$$Q_3 = \theta_2 Q_2 = \theta_1\theta_2\ a - bP_1). \quad (۳)$$

در این‌صورت این مقادیر به ترتیب با توجه به **رابطه (٤)** تا **رابطه (٦)** به‌صورت زیر به‌دست خواهند آمد:

$$Z_1 = \ P_1 - K_1)Q_1 - P_2Q_2 = \ a - bP_1)\ P_1 - \theta_1 P_2 - K_1). \quad (۴)$$

$$Z_2 = P_2Q_2 - \ P_3 + K_2)Q_3 = \theta_1\ a - bP_1)\ P_2 - \theta_2 P_3 - \theta_2 K_2). \quad (۵)$$

$$Z_3 = \ P_3 - K_3)Q_3 = \theta_1\theta_2\ a - bP_1)\ P_3 - K_3). \quad (۶)$$

شایان‌ذکر است به‌منظور نامنفی شدن مقادیر تقاضای محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی موردنیاز و هم‌چنین مقادیر سود اعضای زنجیره‌تامین موردبررسی باید رابطه‌های زیر در تعیین قیمت‌ها درنظر گرفته شوند:

$$P_1 \le \frac{a}{b},\quad P_1 \ge \theta_1 P_2 + K_1,\quad P_2 \ge \theta_2 P_3 + \theta_2 K_2,\quad P_3 \ge K_3. \qquad (۷)$$

بدیهی است هنگامی‌که تولیدکننده حداقل مقدار ممکن را در تعیین قیمت محصول نهایی درنظر می‌گیرد، تقاضای این محصول نامنفی خواهد بود. درواقع اگر تولیدکننده، محصول نهایی را بدون سود به مشتریان بفروشد، انتظار می‌رود که تقاضای آن نامنفی باشد. با توجه به **رابطه (۷)** داریم: $P_1 \ge \theta_1 P_2 + K_1 \ge \theta_1(\theta_2 P_3 + \theta_2 K_2) + K_1 \ge \theta_1(\theta_2 K_3 + \theta_2 K_2) + K_1$؛ بنابراین، حداقل مقدار ممکن برای قیمت محصول نهایی برابر با $K_1 + \theta_1\theta_2 K_2 + \theta_1\theta_2 K_3$ است. با توجه به توضیحات ارایه‌شده، تقاضای محصول نهایی با درنظر گرفتن $P_1 = K_1 + \theta_1\theta_2 K_2 + \theta_1\theta_2 K_3$ نامنفی خواهد بود. به‌عنوان نتیجه فرض زیر به‌عنوان یک فرض بدیهی و منطقی می‌بایست در تعیین مقدار پارامترهای مساله درنظر گرفته شود.

$$a - b\,K_1 + \theta_1\theta_2 K_2 + \theta_1\theta_2 K_3) \ge 0. \qquad (۸)$$

رابطه (۸) به‌عنوان یک فرض اساسی در اثبات شدنی بودن تصمیمات اتخاذشده توسط اعضای زنجیره‌تامین به‌کار گرفته می‌شود. در بخش بعد با استفاده از رویکرد نظریه بازی، تصمیمات موردبررسی اتخاذ خواهند شد.

۳- رویکرد نظریه بازی

همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، نظریه بازی یک رویکرد ریاضی به‌منظور تصمیم‌گیری در شرایطی است که تصمیم یک فرد وابسته به تصمیم افراد دیگر باشد. درواقع در شرایطی که تعدادی تصمیم‌گیرنده با اهداف متعارض سعی بر آن دارند تصمیمات خود را اتخاذ کنند، استفاده از این رویکرد منطقی است. در این تحقیق نیز با توجه به آن‌که تصمیمات اتخاذشده توسط تولیدکننده، انبار ضایعات و بازیافت‌کننده بر روی یکدیگر تاثیر گذاشته و اهداف (توابع سود) آن‌ها با یکدیگر در تعارض هستند، استفاده از رویکرد نظریه بازی برای اتخاذ تصمیمات قابل توجیه خواهد بود.

در این بخش سعی بر آن داریم تا با استفاده از رویکرد نظریه بازی، تصمیمات مطرح‌شده تحت زنجیره‌تامین موردبررسی را اتخاذ نماییم. در زنجیره‌تامین درنظر گرفته‌شده، قدرت تصمیم‌گیری تولیدکننده در بازار بیش‌تر از بازیافت‌کننده و انبار ضایعات است. در چنین شرایطی انتظار می‌رود که سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده بیش‌تر از سودهای تخصیص داده‌شده به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده باشد؛ هم‌چنین با توجه به قدرت بیش‌تر تولیدکننده در بازار نسبت به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده، فرض می‌شود که ابتدا تولیدکننده و سپس انبار ضایعات و بازیافت‌کننده تصمیمات خود را اتخاذ می‌نمایند. تحت این شرایط توالی اتخاذ تصمیمات توسط اعضای زنجیره‌تامین موردبررسی می‌تواند به‌صورت یکی از سه حالت زیر باشد:

- حالت ۱: ابتدا تولیدکننده، سپس بازیافت‌کننده و درنهایت انبار ضایعات قیمت‌های خود را اعلام کنند.
- حالت ۲: ابتدا تولیدکننده، سپس انبار ضایعات و درنهایت بازیافت‌کننده قیمت‌های خود را اعلام کنند.
- حالت ۳: ابتدا تولیدکننده و سپس انبار ضایعات و بازیافت‌کننده به‌صورت هم‌زمان قیمت‌های خود را اعلام کنند.

سه حالت مطرح‌شده منجر به تحلیل مساله با استفاده از رویکرد نظریه بازی تحت سه مدل بازی مختلف می‌شوند. هنگامی‌که ابتدا تولیدکننده، سپس بازیافت‌کننده و درنهایت انبار ضایعات قیمت‌های خود را تعیین می‌کنند (حالت ۱)، از بازی نوع اول (قدرت بازیافت‌کننده بیش‌تر از انبار ضایعات) برای تحلیل مساله استفاده می‌گردد. وقتی ابتدا تولیدکننده، سپس انبار ضایعات و درنهایت بازیافت‌کننده قیمت‌های خود را مشخص می‌کنند (حالت ۲)، از بازی نوع دوم (قدرت انبار ضایعات بیش‌تر از بازیافت‌کننده) برای تحلیل مساله استفاده می‌شود. هم‌چنین هنگامی‌که ابتدا تولیدکننده قیمت محصول نهایی را مشخص می‌کند و سپس انبار ضایعات و بازیافت‌کننده به‌صورت هم‌زمان قیمت‌های خود را تعیین می‌نمایند (حالت ۳)، بازی نوع سوم (انبار ضایعات و بازیافت‌کننده دارای قدرت یکسان) به‌کار گرفته خواهد شد.

۳-۱- بازی نوع اول (قدرت بازیافت‌کننده بیش‌تر از انبار ضایعات)

در بازی نوع اول، قدرت تصمیم‌گیری بازیافت‌کننده بیش‌تر از قدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات است. در این بازی ابتدا تولیدکننده باقدرت تصمیم‌گیری بیش‌تر نسبت به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده، قیمت هر تن محصول نهایی را برای مشتریان تعیین می‌کند. سپس

بازیافت‌کننده باقدرت تصمیم‌گیری بیش‌تر نسبت به انبار ضایعات، قیمت هر تن ضایعات بازیافت‌شده را به تولیدکننده اعلام می‌کند. درنهایت انبار ضایعات، قیمت هر تن ضایعات بازیافت‌نشده را برای بازیافت‌کننده مشخص می‌کند. بازی نوع اول در **رابطه (۹)** فرمول‌بندی می‌گردد.

$$\begin{cases} \text{سطح اول (تعیین تصمیمات تولیدکننده)} \\ \max\limits_{P_1} \; Z_1 = \; a - bP_1)\; P_1 - \theta_1 P_2 - K_1). \\ \text{سطح دوم (تعیین تصمیمات بازیافت‌کننده)} \\ \max\limits_{P_2} \; Z_2 = \theta_1\; a - bP_1)\; P_2 - \theta_2 P_3 - \theta_2 K_2). \\ \text{سطح سوم (تعیین تصمیمات انبار ضایعات)} \\ \max\limits_{P_3} \; Z_3 = \theta_1\theta_2\; a - bP_1)\; P_3 - K_3). \end{cases} \qquad (۹)$$

اکنون سعی می‌کنیم قیمت‌های مربوط به محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی را تعیین نماییم. تحت این شرایط ابتدا با آگاهی از تصمیمات اتخاذشده توسط تولیدکننده و بازیافت‌کننده، انبار ضایعات تلاش می‌کند تا قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده را نسبت به قیمت محصول نهایی و قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده تعیین کند. سپس با آگاهی از تصمیمات اتخاذشده توسط تولیدکننده، بازیافت‌کننده قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده را نسبت به قیمت محصول نهایی مشخص می‌نماید. درنهایت تولیدکننده با حداکثر نمودن تابع سود خود، قیمت محصول نهایی را اعلام می‌کند. در بازگشت با مشخص شدن قیمت محصول نهایی، قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده و با تعیین این دو قیمت، قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده محاسبه خواهند شد. هم‌چنین با جای‌گذاری قیمت‌های اعلام‌شده در **رابطه (۱)** تا **رابطه (٦)**، تقاضای محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی و مقادیر سود تخصیص داده‌شده به اعضای زنجیره‌تامین به‌دست می‌آیند.

در بازی نوع اول قدرت تصمیم‌گیری تولیدکننده بیش‌تر از بازیافت‌کننده و قدرت تصمیم‌گیری بازیافت‌کننده بیش‌تر از انبار ضایعات است. در این شرایط انتظار می‌رود که سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده بیش‌تر از سود تخصیص داده‌شده به بازیافت‌کننده و سود تخصیص داده‌شده به بازیافت‌کننده بیش‌تر از سود تخصیص داده‌شده به انبار ضایعات باشد؛ بنابراین، در این بازی فرض می‌گردد که سود تولیدکننده حداقل به‌اندازه دو برابر سود بازیافت‌کننده و سود بازیافت‌کننده حداقل به‌اندازه دو برابر سود انبار ضایعات است؛ داریم:

$$\frac{dZ_3}{dP_3} = \; a - bP_1)\theta_1\theta_2 \geq 0, \quad \frac{d^2Z_3}{dP_3{}^2} = 0. \qquad (۱۰)$$

به‌وضوح با توجه به **رابطه (۱۰)** تابع سود Z_3 نسبت به P_3 به‌صورت صعودی و خطی است؛ بنابراین، انبار ضایعات حداکثر مقدار شدنی را برای P_3 انتخاب می‌کند. قبلا فرض نمودیم که در بازی نوع اول، سود بازیافت‌کننده حداقل به‌اندازه دو برابر سود انبار ضایعات است. با ساده‌سازی $Z_2 \geq 2Z_3$ رابطه $P_3 \leq (P_2/\theta_2 - K_2 + 2K_3)/3$ به‌دست می‌آید. به‌عنوان نتیجه می‌توان گفت که حداکثر مقدار شدنی P_3 برابر با $(P_2/\theta_2 - K_2 + 2K_3)/3$ است. با جای‌گذاری $P_3 = (P_2/\theta_2 - K_2 + 2K_3)/3$ در تابع سود بازیافت‌کننده، تابع سود جدید $Z_2' = 2\theta_1\; a - bP_1)\; P_2 - \theta_2 K_2 - \theta_2 K_3)/3$ حاصل می‌گردد، داریم:

$$\frac{dZ_3}{dP_3} = \; a - bP_1)\theta_1\theta_2 \geq 0, \quad \frac{d^2Z_3}{dP_3{}^2} = 0. \qquad (۱۱)$$

با توجه به **رابطه (۱۱)** تابع Z_2' نسبت به P_2 به‌صورت صعودی و خطی است. درنتیجه بازیافت‌کننده نیز حداکثر مقدار شدنی را برای P_2 درنظر می‌گیرد. ازآن‌جایی‌که سود تولیدکننده حداقل به‌اندازه دو برابر سود بازیافت‌کننده است، رابطه $P_2 \leq 3\; P_1 - K_1)/7\,\theta_1 + 4\; K_2 + K_3)\,\theta_2/7$ با ساده‌سازی $Z_1 \geq 2\,Z_2'$ به‌دست می‌آید. به‌عبارت‌دیگر حداکثر مقدار شدنی P_2 برابر با $3\; P_1 - K_1)/7\theta_1 + 4(K_2 + K_3)\,\theta_2/7$ خواهد بود. با جای‌گذاری $P_2 = 3\; P_1 - K_1)/7\theta_1 + 4(K_2 + K_3)\theta_2/7$ در تابع سود تولیدکننده، تابع جدید $Z_1' = 4\; a - bP_1)\; P_1 - K_1 - \theta_1\theta_2 K_2 - \theta_1\theta_2 K_3)/7$ حاصل می‌شود. مشتق‌های مرتبه اول و دوم Z_1' نسبت به P_1 به‌صورت زیر هستند:

$$\frac{dZ_1'}{dP_1} = \frac{4}{7}\; a + bK_1 - 2bP_1 + \theta_1\theta_2 bK_2 + \theta_1\theta_2 bK_3), \quad \frac{d^2Z_1'}{dP_1{}^2} = -\frac{8}{7}b < 0. \qquad (۱۲)$$

با توجه به **رابطه (۱۲)** تابع Z_1' نسبت به P_1 مقعر است؛ بنابراین، می‌توان گفت که اکسترمم Z_1' در صورت شدنی بودن منجر به حداکثر شدن این تابع خواهد شد. با حل مشتق مرتبه اول نشان داده‌شده در **رابطه (۱۲)**، P_1 محاسبه می‌شود. با جای‌گذاری این مقدار در رابطه‌های

$P_2 = 3\,P_1 - K_1)/7\theta_1 + 4K_2 + K_{3*})\theta_2/7$ و $P_3 = (P_2/\theta_2 - K_2 + 2K_3)/3$، قیمت‌های تعیین‌شده توسط اعضای زنجیره‌تامین موردبررسی به‌صورت زیر خواهند بود:

$$P_4^{\,1} = \frac{a + bK_1 + b\theta_1\theta_2(K_2 + K_3)}{2b},$$
$$P_2^{\,1} = \frac{2a - 3bK_1 + 11b\theta_1\theta_2\,K_2 + K_3)}{14b\theta_1},$$
$$P_3^{\,1} = \frac{a - bK_1 + b\theta_1\theta_2\,13K_3 - K_2)}{14b\theta_1\theta_2}. \qquad (۱۳)$$

به‌سادگی و با درنظر گرفتن **رابطه (۸)** ثابت می‌شود که قیمت‌های به‌دست‌آمده، در **رابطه (۷)** صادق بوده و درنتیجه جواب تعیین‌شده در **رابطه (۱۳)** برای بازی نوع اول شدنی است. با جای‌گذاری قیمت‌های تعیین‌شده در **رابطه (۱)** تا **رابطه (٦)**، مقادیر تقاضای محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده و بازیافت‌نشده و هم‌چنین مقادیر سود تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات محاسبه می‌گردند.

۲-۳- بازی نوع دوم (قدرت انبار ضایعات بیش‌تر از بازیافت‌کننده)

در بازی نوع دوم، قدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات بیش‌تر از قدرت تصمیم‌گیری بازیافت‌کننده است. تحت این شرایط ابتدا تولیدکننده باقدرت تصمیم‌گیری بیش‌تر نسبت به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده، قیمت هر تن محصول نهایی را مشخص می‌کند. سپس انبار ضایعات باقدرت تصمیم‌گیری بیش‌تر نسبت به بازیافت‌کننده، قیمت هر تن ضایعات بازیافت‌نشده را برای بازیافت‌کننده تعیین می‌نماید. درنهایت بازیافت‌کننده، قیمت هر تن ضایعات بازیافت‌شده را به تولیدکننده اعلام می‌کند. مدل بازی نوع دوم در **رابطه (۱٤)** ارایه‌شده است.

$$\begin{cases} \text{سطح اول (تعیین تصمیمات تولیدکننده)} \\ \max\limits_{P_1} Z_1 = \ a - bP_1)\ P_1 - \theta_1 P_2 - K_1). \\ \text{سطح دوم (تعیین تصمیمات انبار ضایعات)} \\ \max\limits_{P_3} Z_3 = \theta_1\theta_2\ a - bP_1)\ P_3 - K_3). \\ \text{سطح سوم (تعیین تصمیمات بازیافت‌کننده)} \\ \max\limits_{P_2} Z_2 = \theta_1\ a - bP_1)\ P_2 - \theta_2 P_3 - \theta_2 K_2). \end{cases} \qquad (۱۴)$$

ازآن‌جایی‌که در بازی نوع دوم قدرت تصمیم‌گیری تولیدکننده بیش‌تر از انبار ضایعات و قدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات بیش‌تر از بازیافت‌کننده است، می‌توان انتظار داشت که سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده بیش‌تر از سود تخصیص داده‌شده به انبار ضایعات و سود تخصیص داده‌شده به انبار ضایعات بیش‌تر از سود تخصیص داده‌شده به بازیافت‌کننده باشد. با توجه به توضیحات ارایه‌شده در این بازی فرض می‌شود که سود تولیدکننده حداقل به‌اندازه دو برابر سود انبار ضایعات و سود انبار ضایعات حداقل به‌اندازه دو برابر سود بازیافت‌کننده است.

با روندی کاملا مشابه با آن‌چه برای تعیین جواب بازی نوع اول استفاده شد، می‌توان جواب بازی نوع دوم را نیز محاسبه نمود. درواقع برای تعیین این جواب کافی است توالی اتخاذ تصمیمات مربوط به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده جابه‌جا گردد. قیمت‌های تعیین‌شده توسط اعضای زنجیره‌تامین موردبررسی در بازی نوع دوم با توجه به **رابطه (۱۵)** به‌دست خواهند آمد.

$$P_1^{\,2} = \frac{a + bK_1 + b\theta_1\theta_2(K_2 + K_3)}{2b},$$
$$P_2^{\,2} = \frac{3a - 3bK_1 + 11b\theta_1\theta_2\,K_2 - K_3)}{14b\theta_1\theta_2},$$
$$P_3^{\,2} = \frac{a - bK_1 + b\theta_1\theta_2\,6K_3 - K_2)}{7b\theta_1\theta_2}. \qquad (۱۵)$$

با جای‌گذاری قیمت‌های محاسبه‌شده در **رابطه (۱)** تا **رابطه (٦)**، مقادیر تقاضای محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی و هم‌چنین مقادیر اعضای زنجیره‌تامین حاصل می‌گردند.

۳-۳- بازی نوع سوم (بازیافت‌کننده و انبار ضایعات دارای قدرت یکسان)

در بازی نوع سوم، قدرت تصمیم‌گیری بازیافت‌کننده و انبار ضایعات یکسان درنظر گرفته شده‌اند. در این بازی ابتدا تولیدکننده باقدرت تصمیم‌گیری بیش‌تر نسبت به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده، قیمت هر تن محصول نهایی را برای مشتریان مشخص می‌نماید. سپس انبار ضایعات و بازیافت‌کننده باقدرت تصمیم‌گیری یکسان به ترتیب قیمت هر تن ضایعات بازیافت‌نشده و قیمت هر تن ضایعات بازیافت‌شده را به‌طور هم‌زمان تعیین می‌کنند. بازی نوع سوم در **رابطه (۱۶)** فرمول‌بندی می‌شود.

$$\begin{cases} \text{سطح اول (تعیین تصمیمات تولیدکننده)} \\ \max\limits_{P_1} Z_1 = (a - bP_1)(P_1 - \theta_1 P_2 - K_1). \\ \text{سطح دوم (تعیین تصمیمات انبار ضایعات و بازیافت‌کننده)} \\ \max\limits_{P_2} Z_2 = (\theta_1 a - bP_1)(P_2 - \theta_2 P_3 - \theta_2 K_2), \\ \max\limits_{P_3} Z_3 = \theta_1\theta_2 (a - bP_1)(P_3 - K_3). \end{cases} \quad (۱۶)$$

تحت بازی نوع سوم، ابتدا با آگاهی از تصمیم‌های اتخاذشده توسط تولیدکننده، انبار ضایعات و بازیافت‌کننده به ترتیب قیمت‌های مربوط به ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده و بازیافت‌شده را نسبت به قیمت محصول نهایی تعیین می‌کنند. سپس تولیدکننده با حداکثر نمودن مقدار سود خود، قیمت محصول نهایی را به مشتریان اعلام می‌نماید. درنهایت با مشخص شدن قیمت محصول نهایی، قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده و قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده محاسبه می‌گردند.

شایان‌ذکر است در بازی نوع سوم قدرت تصمیم‌گیری تولیدکننده بیش‌تر از انبار ضایعات و بازیافت‌کننده است؛ بنابراین، انتظار می‌رود که سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده بیش‌تر از سودهای تخصیص داده‌شده به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده باشد. بر این اساس در این بازی فرض می‌شود که سود تولیدکننده حداقل به‌اندازه دو برابر سودهای انبار ضایعات و بازیافت‌کننده است، داریم:

$$\frac{dZ_2}{dP_2} = (a - bP_1)\theta_1 \geq 0, \quad \frac{d^2Z_2}{dP_2^{\,2}} = 0, \qquad \frac{dZ_3}{dP_3} = (a - bP_1)\theta_1\theta_2 \geq 0, \quad \frac{d^2Z_3}{dP_3^{\,2}} = 0. \quad (۱۷)$$

با توجه به **رابطه (۱۷)** توابع سود Z_2 و Z_3 به ترتیب نسبت به P_2 و P_3 به‌صورت صعودی و خطی هستند؛ بنابراین، از دیدگاه بازیافت‌کننده و انبار ضایعات حداکثر مقادیر شدنی برای P_2 و P_3 انتخاب می‌شوند. در بازی نوع سوم، سود تولیدکننده حداقل به‌اندازه دو برابر سودهای انبار ضایعات و بازیافت‌کننده است. با درنظر گرفتن هم‌زمان رابطه $Z_1 \geq 2Z_2$ و $Z_1 \geq 2Z_3$ رابطه $P_2 \leq (P_1 - K_1 + \theta_1\theta_2K_2 + \theta_1\theta_2K_3)/2\theta_1$ و $P_3 \leq (P_1 - K_1 - \theta_1\theta_2K_2 + 3\theta_1\theta_2K_3)/4\theta_1\theta_2$ حاصل می‌گردند. به‌عبارت‌دیگر حداکثر مقادیر شدنی برای P_2 و P_3 به ترتیب برابر با $(P_1 - K_1 + \theta_1\theta_2K_2 + \theta_1\theta_2K_3)/2\theta_1$ و $(P_1 - K_1 - \theta_1\theta_2K_2 + 3\theta_1\theta_2K_3)/4\theta_1\theta_2$ هستند. با جای‌گذاری رابطه‌های $P_2 = (P_1 - K_1 + \theta_1\theta_2K_2 + \theta_1\theta_2K_3)/2\theta_1$ و $P_3 = (P_1 - K_1 - \theta_1\theta_2K_2 + 3\theta_1\theta_2K_3)/4\theta_1\theta_2$ در تابع سود تولیدکننده، تابع جدید $Z_1' = (a - bP_1)(P_1 - K_1 - \theta_1\theta_2K_2 - \theta_1\theta_2K_3)/2$ به‌دست می‌آید. داریم:

$$\frac{dZ_1'}{dP_1} = \frac{1}{2}(a + bK_1 - 2bP_1 + \theta_1\theta_2bK_2 + \theta_1\theta_2bK_3), \quad \frac{d^2Z_1'}{dP_1^{\,2}} = -b < 0. \quad (۱۸)$$

به‌وضوح با توجه به **رابطه (۱۸)** تابع Z_1' نسبت به P_1 مقعر است؛ بنابراین، اکسترمم Z_1' در صورت شدنی بودن حداکثر مقدار آن را به همراه خواهد داشت. با حل مشتق مرتبه اول ارایه‌شده در **رابطه (۱۸)**، P_1 تعیین می‌گردد. با جای‌گذاری این مقدار در رابطه‌های مربوط به P_2 و P_3، قیمت‌های اعلام‌شده توسط اعضای زنجیره‌تامین در بازی نوع سوم با توجه به **رابطه (۱۹)** محاسبه خواهند شد.

$$P_1^{\,3} = \frac{a + bK_1 + b\theta_1\theta_2(K_2 + K_3)}{2b}, \quad P_2^{\,3} = \frac{a - bK_1 + 3b\theta_1\theta_2(K_2 - K_3)}{14b\theta_1\theta_2}, \quad P_3^{\,3} = \frac{a - bK_1 + b\theta_1\theta_2(7K_3 - K_2)}{8b\theta_1\theta_2}. \quad (۱۹)$$

با توجه به **رابطه (۸)** ثابت می‌گردد که قیمت‌های به‌دست‌آمده، در **رابطه (۷)** صدق می‌کنند؛ بنابراین، جواب تعیین‌شده برای بازی نوع سوم شدنی است. با جای‌گذاری قیمت‌های ارایه‌شده در **رابطه (۱)** تا **رابطه (٦)**، مقادیر تقاضای محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی و هم‌چنین مقادیر سود تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات به‌دست می‌آیند.

۴- یافته‌ها و نتایج

در این بخش نتایج حاصل از مدل‌های نظریه بازی ارایه می‌شوند. بدین منظور تصمیمات اتخاذشده، تحت سه حالت مختلف یعنی قدرت بازیافت‌کننده بیش‌تر از انبار ضایعات (حالت ۱)، قدرت انبار ضایعات بیش‌تر از بازیافت‌کننده (حالت ۲) و انبار ضایعات و بازیافت‌کننده دارای قدرت یکسان (حالت ۳) موردبررسی قرار خواهند گرفت.

۴-۱- مقایسه تصمیمات

ابتدا تصمیمات اتخاذشده تحت سه حالت مذکور مقایسه خواهند شد. بدین منظور قیمت‌ها و تقاضاهای مربوط به محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی و مقادیر سود تخصیص داده‌شده به اعضای زنجیره‌تامین تحت سه نوع بازی موردبررسی مقایسه می‌شوند. رابطه‌های زیر برای قیمت‌های تعیین‌شده برقرار هستند:

$$\begin{aligned} P_1^1 &= P_1^2 = P_1^3, \\ P_2^1 &= P_2^2 \le P_2^3, \\ P_3^1 &\le P_3^3 \le P_3^2. \end{aligned} \qquad (۲۰)$$

نتایج ارایه‌شده در **رابطه (۲۰)** به‌سادگی از طریق مقایسه قیمت‌ها و با توجه به **رابطه (۸)** قابل‌دستیابی هستند.

نتیجه ۱: قدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات و بازیافت‌کننده تاثیری بر روی نحوه اتخاذ تصمیمات توسط تولیدکننده نداشته و قیمت محصول نهایی تعیین‌شده توسط تولیدکننده تحت سه حالت مختلف موردبررسی یکسان هستند. قیمت اعلام‌شده توسط بازیافت‌کننده برای ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده در حالت‌هایی که قدرت تصمیم‌گیری وی کم‌تر و یا بیش‌تر از انبار ضایعات باشد، یکسان بوده و در حالتی که قدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات و بازیافت‌کننده یکسان هستند، این قیمت بیش‌تر از دو حالت دیگر است؛ هم‌چنین هنگامی‌که قدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات بیش‌تر از بازیافت‌کننده باشد، قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده تعیین‌شده توسط انبار ضایعات بیش‌تر از سایر حالت‌های بوده و هنگامی‌که قدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات کم‌تر از بازیافت‌کننده است، این قیمت کم‌تر از حالتی خواهد بود که آن‌ها دارای قدرت تصمیم‌گیری یکسان هستند.

با درنظر گرفتن مقادیر تقاضای مربوط به محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده و ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده تحت سه بازی تحلیل‌شده **رابطه (۲۱)** به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned} Q_1^1 &= Q_1^2 = Q_1^3, \\ Q_2^1 &= Q_2^2 = Q_2^3, \\ Q_3^1 &= Q_3^2 = Q_3^3. \end{aligned} \qquad (۲۱)$$

نتیجه ۲: قدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات و بازیافت‌کننده تاثیری بر روی مقادیر تقاضای مربوط به محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده و ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده نداشته و این مقادیر تحت سه حالت مختلف موردبررسی یکسان هستند.

درواقع با توجه به این‌که قیمت‌های تعیین‌شده توسط تولیدکننده برای محصول نهایی تحت سه بازی تحلیل‌شده یکسان هستند؛ بنابراین، تقاضای مشتریان برای محصول نهایی نیز تحت سه حالت مذکور یکسان خواهند بود. از طرف دیگر چون مقادیر تقاضای ضایعات بازیافت‌شده و ضایعات بازیافت‌نشده موردنیاز کاملا وابسته به تقاضای محصول نهایی درنظر گرفته شده‌اند، این مقادیر نیز تحت حالت‌های مختلف یکسان هستند.

با مقایسه مقادیر سود تخصیص داده‌شده به اعضای زنجیره‌تامین تحت سه بازی موردبررسی، **رابطه (۲۲)** حاصل می‌شوند:

$$\begin{aligned} Z_1^1 &= Z_1^2 \ge Z_1^3, \\ Z_2^1 &\ge Z_2^3 \ge Z_2^2, \\ Z_3^2 &\ge Z_3^3 \ge Z_3^1. \end{aligned} \qquad (۲۲)$$

نتیجه ۳: سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده در حالت‌هایی که انبار ضایعات و بازیافت‌کننده دارای قدرت تصمیم‌گیری متفاوتی هستند، یکسان بوده و این مقدار بیش‌تر از حالتی است که آن‌ها قدرت تصمیم‌گیری مشابهی دارند. هم‌چنین بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر سود تخصیص داده‌شده به بازیافت‌کننده در حالت‌هایی حاصل می‌شوند که قدرت تصمیم‌گیری وی به ترتیب بیش‌تر و کم‌تر از انبار ضایعات است. به‌وضوح این نتیجه برای سود تخصیص داده‌شده به انبار ضایعات به‌صورت برعکس برقرار خواهد بود.

۲-۴- مثال عددی

تولیدکننده‌ای را درنظر بگیرید که لیوان یک‌بارمصرف تولید نموده و برای تولید آن از ضایعات پلاستیکی استفاده می‌کند. بدین منظور وی ضایعات پلاستیکی را به‌صورت بازیافت‌شده از یک بازیافت‌کننده تهیه می‌کند. بازیافت‌کننده نیز ضایعات پلاستیکی موردنیاز خود را به‌صورت بازیافت‌نشده از یک انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت می‌کند.

فرض کنید هزینه تولید هر تن لیوان یک‌بار برای تولیدکننده برابر با $K_1 = 1200000$ تومان، هزینه بازیافت هر تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده برای بازیافت‌کننده برابر با $K_2 = 700000$ تومان و هزینه جمع‌آوری هر تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده برای انبار ضایعات برابر با $K_3 = 300000$ تومان باشند. فرض کنید مقدار ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک تن لیوان یک‌بارمصرف برابر با $\theta_1 = 2$ تن بوده و مقدار ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده موردنیاز برای تولید یک تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده برابر با $\theta_2 = 4$ تن باشند؛ هم‌چنین حداکثر تقاضای مشتریان در بازار برای لیوان یک‌بارمصرف برابر با $a = 200000$ تن و کشسانی تقاضای این محصول نسبت به قیمت آن برابر با $b = 0.02$ تخمین زده شده است. درواقع میزان کاهش تقاضای مشتریان به ازای یک تومان افزایش قیمت آن برابر با ۲۰ کیلوگرم خواهد بود.

نتایج حاصل از بازی‌های موردبررسی تحت سه حالت مختلف درنظر گرفته‌شده برای این مثال عددی در **جدول ۲** خلاصه شده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، قیمت‌های تعیین‌شده برای محصول نهایی در بازی‌های مختلف یکسان بوده و همین امر منجر به تعیین تقاضاهای مشابه برای محصول نهایی و مواد ضایعاتی تحت بازی‌های مختلف شده است. هم‌چنین در بازی‌های نوع اول و دوم، مقادیر سود تخصیص داده شده به تولیدکننده یکسان بوده و در بازی نوع سوم، انبار ضایعات و بازیافت‌کننده سودهای مشابهی دریافت می‌کنند.

جدول ۲- نتایج حاصل از بازی‌های موردبررسی برای مثال عددی.

Table 2- The results of the examined games for a numerical example.

عنوان	بازی نوع اول	بازی نوع دوم	بازی نوع سوم
مقادیر قیمت (تومان به ازای هر تن)			
قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده	307142.86	314285.71	312500.00
قیمت ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده	4085714.29	4085714.29	4100000.00
قیمت محصول نهایی	9600000.00	9600000.00	9600000.00
مقادیر تقاضا (تن)			
تقاضای ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده	64000	64000	64000
تقاضای ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده	16000	16000	16000
تقاضای محصول نهایی	8000	8000	8000
مقادیر سود (تومان)			
سود انبار ضایعات	457142857	914285714	800000000
سود بازیافت‌کننده	914285714	457142857	800000000
سود تولیدکننده	1828571428	1828571428	1600000000

جدول ۳- تحلیل حساسیت مقادیر سود نسبت به هزینه جمع‌آوری ضایعات پلاستیکی.

Table 3- Sensitivity analysis for collecting cost of the plastic waste.

مقادیر سود	بازی نوع اول	بازی نوع دوم	بازی نوع سوم
سود انبار ضایعات	$-\frac{1}{14}\theta_1\theta_2 A$	$-\frac{1}{7}\theta_1\theta_2 A$	$-\frac{1}{8}\theta_1\theta_2 A$
سود بازیافت‌کننده	$-\frac{1}{7}\theta_1\theta_2 A$	$-\frac{1}{14}\theta_1\theta_2 A$	$-\frac{1}{8}\theta_1\theta_2 A$
سود تولیدکننده	$-\frac{2}{7}\theta_1\theta_2 A$	$-\frac{2}{7}\theta_1\theta_2 A$	$-\frac{1}{4}\theta_1\theta_2 A$

نتیجه ٤: با افزایش هزینه تولید محصول نهایی، هزینه بازیافت ضایعات پلاستیکی و هزینه جمع‌آوری آن‌ها، مقادیر سود تخصیص داده‌شده به اعضای زنجیره‌تامین تحت بازی‌های موردبررسی کاهش خواهند یافت؛ بنابراین، از این دیدگاه بهتر است آن‌ها تصمیماتی اتخاذ نمایند که در صورت امکان هزینه‌های مذکور کاهش یابند.

هم‌چنین تحلیل حساسیت مقادیر سود به‌دست‌آمده نسبت به پتانسیل فروش محصول نهایی (a) در **جدول ٤** نشان داده شده است.

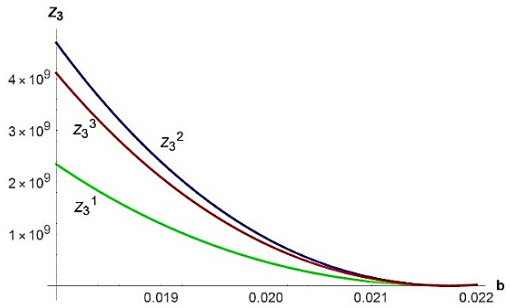
جدول ۴- تحلیل حساسیت مقادیر سود نسبت به پتانسیل فروش محصول نهایی.

Table 4- Sensitivity analysis for market base of the final product.

مقادیر سود	بازی نوع اول	بازی نوع دوم	بازی نوع سوم
سود انبار ضایعات	$\frac{A}{14b}$	$\frac{A}{7b}$	$\frac{A}{8b}$
سود بازیافت‌کننده	$\frac{A}{7b}$	$\frac{A}{14b}$	$\frac{A}{8b}$
سود تولیدکننده	$\frac{2A}{7b}$	$\frac{2A}{7b}$	$\frac{A}{4b}$

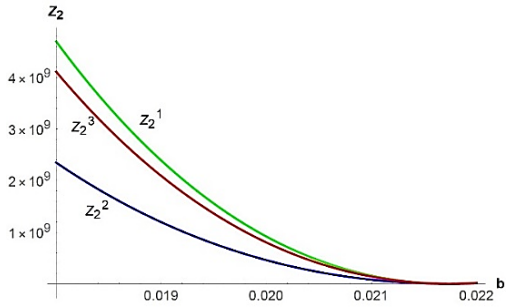
نتیجه ٥: با افزایش پتانسیل فروش محصول نهایی، مقادیر سود به‌دست‌آمده تحت سه حالت موردبررسی نیز افزایش می‌یابند. به‌عنوان نتیجه می‌توان از طریق اتخاذ استراتژی‌های مناسب بازاریابی، مقادیر سود تخصیص داده‌شده به اعضا را افزایش داد.

با توجه به پیچیدگی‌های موجود در تعیین علامت مشتق‌های مرتبه اول سودها نسبت به کشسانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن (b)، مقدار ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک تن محصول نهایی (θ_1) و مقدار ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده موردنیاز برای تولید یک تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده (θ_2)، از رویکرد تحلیل حساسیت عددی برای بررسی تاثیر تغییرات این پارامترها بر روی مقادیر سود استفاده می‌گردد. بدین منظور مقادیر مربوط به مثال عددی ارایه‌شده در بخش ٤-۲ برای تحلیل حساسیت به‌کار گرفته می‌شوند. تغییرات سودهای تخصیص داده‌شده به اعضا نسبت به کشسانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن در **شکل ۲** نشان داده شده‌اند. این نمودارها با تغییر پارامتر b و تثبیت سایر پارامترهای مقداردهی شده در مثال عددی به‌دست آمده‌اند.



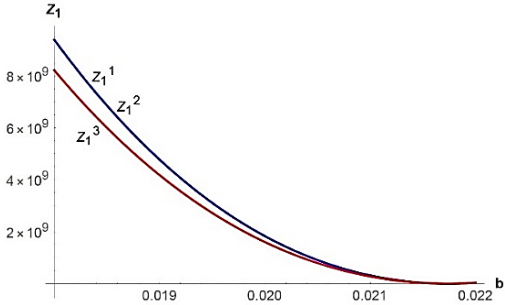
الف- تغییرات سود انبار ضایعات.

a- Changes in the profit of the waste warehouse.



ب- تغییرات سود بازیافت‌کننده.

b- Changes in the recycler's profit.

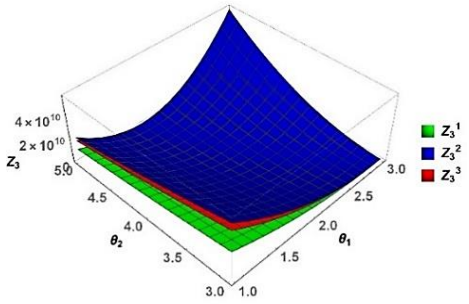


ج- تغییرات سود تولیدکننده.
C- Producer profit changes.

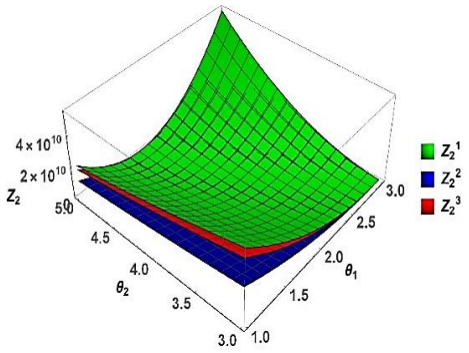
شکل ۲- تحلیل حساسیت مقادیر سود نسبت به کشسانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن.
Figure 2- Sensitivity analysis for elasticity of the demand to its price.

نتیجه ٦: با افزایش کشسانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن، مقادیر سود تخصیص داده‌شده به اعضای زنجیره‌تامین کاهش می‌یابند. درواقع هرچقدر تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن حساس‌تر باشد، سود اعضا کم‌تر خواهد بود.

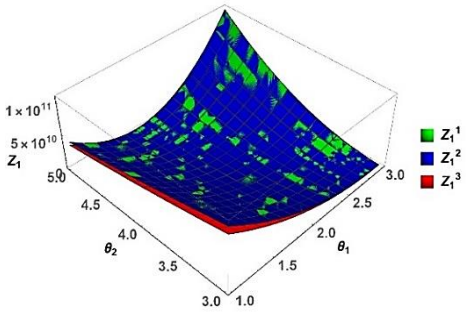
هم‌چنین تغییرات مقادیر سود نسبت به مقدار ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک تن محصول نهایی و مقدار ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده موردنیاز برای تولید یک تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده به‌طور هم‌زمان در **شکل ۳** نشان داده شده‌اند.



الف- تغییرات سود انبار ضایعات.
a- Changes in the profit of the waste warehouse.



ب- تغییرات سود بازیافت‌کننده.
b- Changes in the recycler's profit.



ج- تغییرات سود تولیدکننده.
C- Producer profit changes.

شکل ۳- تحلیل حساسیت مقادیر سود نسبت به ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده و بازیافت‌نشده موردنیاز.
Figure 3- Sensitivity analysis for the required non-recycled and recycled plastic waste.

نتیجه ۷: هنگامی‌که ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک تن محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده موردنیاز برای تولید یک تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده هر دو به‌طور هم‌زمان افزایش و یا کاهش پیدا می‌کنند، سود اعضا تحت سه حالت موردبررسی افزایش می‌یابند؛ این در حالی است که اگر یکی از آن‌ها کاهش و دیگری افزایش یابد، مقادیر سود کاهش خواهند یافت.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله زنجیره‌تامینی شامل انبار ضایعات، بازیافت‌کننده و تولیدکننده برای تولید محصولاتی از قبیل ظروف یک‌بارمصرف که در تولید آن‌ها از ضایعات پلاستیکی استفاده می‌شود، درنظر گرفته شد. تحت این ساختار، انبار ضایعات، ضایعات پلاستیکی موردنیاز را به‌صورت بازیافت‌نشده جمع‌آوری و بازیافت‌کننده آن‌ها را بازیافت می‌کند. درنهایت تولیدکننده با استفاده از ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده، محصول نهایی را تولید می‌نماید. در زنجیره‌تامین مذکور، انبار ضایعات قیمت هر تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده را برای بازیافت‌کننده، بازیافت‌کننده قیمت هر تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده را برای تولیدکننده و تولیدکننده قیمت هر تن از محصول نهایی را برای مشتریان تعیین می‌کنند.

در زنجیره‌تامین موردبررسی فرض نمودیم که قدرت تصمیم‌گیری تولیدکننده در بازار بیش‌تر از بازیافت‌کننده و انبار ضایعات بوده و سه حالت مختلف برای قدرت تصمیم‌گیری مربوط به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده درنظر گرفته شدند. در واقع قدرت تصمیم‌گیری بازیافت‌کننده می‌تواند بیش‌تر (حالت ۱)، کم‌تر (حالت ۲) و یا مساوی (حالت ۳) باقدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات باشد.

در ادامه با استفاده از رویکرد نظریه بازی، تصمیمات مطرح‌شده در زنجیره‌تامین موردبررسی تحت سه حالت مذکور اتخاذ شدند. سپس قیمت‌ها، تقاضاها و مقادیر سود تخصیص داده شده به اعضای زنجیره‌تامین تحت حالت‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفتند. درنهایت یک تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مساله انجام شد تا تاثیر تغییرات پارامترها بر روی مقادیر سود تخصیص داده‌شده به اعضای زنجیره‌تامین مشخص شوند. نتایج حاکی از آن هستند که:

قدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات و بازیافت‌کننده تاثیری بر روی نحوه اتخاذ تصمیمات توسط تولیدکننده نداشته و قیمت محصول نهایی تعیین‌شده توسط تولیدکننده تحت حالت‌های مختلف یکسان هستند. قدرت تصمیم‌گیری انبار ضایعات و بازیافت‌کننده تاثیری بر روی مقادیر تقاضای مربوط به محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده و ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده ندارد. سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده در حالت‌هایی که انبار ضایعات و بازیافت‌کننده دارای قدرت تصمیم‌گیری متفاوتی هستند، یکسان بوده و این مقدار بیش‌تر از حالتی است که آن‌ها قدرت تصمیم‌گیری مشابهی دارند. هرچقدر تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن حساس‌تر باشد، سود اعضا کم‌تر خواهد بود؛ هم‌چنین هنگامی‌که ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده و بازیافت‌نشده موردنیاز برای تولید محصول نهایی به‌طور هم‌زمان افزایش و یا کاهش پیدا می‌کنند، سود اعضا افزایش می‌یابند.

در تحقیق فعلی تقاضاهای محصول نهایی و ضایعات پلاستیکی توابعی خطی نسبت به قیمت آن‌ها درنظر گرفته شدند. در مطالعات آتی می‌توان شکل‌های دیگری از توابع تقاضا را موردبررسی قرار داد. در مطالعه فعلی تمامی پارامترهای مساله به‌صورت قطعی درنظر گرفته شدند. در تحقیقات بعدی می‌توان از مدل‌سازی فازی و یا احتمالی برای بررسی عدم قطعیت در مساله استفاده نمود [34]–[32]. در تحقیقات آتی می‌توان از سایر مدل‌های نظریه بازی ارایه شده در ادبیات موضوع برای اخذ تصمیمات در مساله موردبررسی استفاده نمود. می‌توان تصمیمات دیگری ازجمله سرویس‌دهی و خدمات را نیز در ساختار معرفی‌شده درنظر گرفت؛ هم‌چنین می‌توان از انواع قراردادهای معرفی‌شده در مدیریت زنجیره‌تامین برای هماهنگ‌سازی تصمیمات استفاده نمود.

منابع مالی

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که در فرایند تحقیق، هیچ‌گونه بودجه و یا کمک هزینه تحقیق دریافت ننموده‌اند.

تعارض با منافع

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضادی در منافع در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد، همه نویسندگان نسخه نهایی ارسال‌شده را مشاهده و تایید کرده‌اند. نویسندگان تضمین می‌کنند که مقاله اثر اصلی آن‌ها بوده، قبلا چاپ نشده و در حال حاضر تحت انتشار نمی‌باشد.

منابع

[1] Rautela, R., Arya, S., Vishwakarma, S., Lee, J., Kim, K. H., & Kumar, S. (2021). E-waste management and its effects on the environment and human health. *Science of the total environment*, *773*, 145623. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145623

[2] Hantoko, D., Li, X., Pariatamby, A., Yoshikawa, K., Horttanainen, M., & Yan, M. (2021). Challenges and practices on waste management and disposal during COVID-19 pandemic. *Journal of environmental management*, *286*, 112140. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112140

[3] Salmenperä, H., Pitkänen, K., Kautto, P., & Saikku, L. (2021). Critical factors for enhancing the circular economy in waste management. *Journal of cleaner production*, *280*, 124339. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124339

[4] Jafari, H., Safarzadeh, S., & Azad-Farsani, E. (2022). Effects of governmental policies on energy-efficiency improvement of hydrogen fuel cell cars: A game-theoretic approach. *Energy*, *254*, 124394. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124394

[5] Guo, W., Xi, B., Huang, C., Li, J., Tang, Z., Li, W., … Wu, W. (2021). Solid waste management in China: Policy and driving factors in 2004–2019. *Resources, conservation and recycling*, *173*, 105727. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105727

[6] Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C. C., & Tam, V. W. Y. (2021). Effective construction and demolition waste management assessment through waste management hierarchy; a case of Australian large construction companies. *Journal of cleaner production*, *312*, 127790. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127790

[7] Jafari, H. (2019). Sustainable development by reusing of recyclables in a textile industry including two collectors and three firms: A game-theoretic approach for pricing decisions. *Journal of cleaner production*, *229*, 598–610. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.222

[8] Chen, J., Zhang, B., Luo, L., Zhang, F., Yi, Y., Shan, Y., … Lü, X. (2021). A review on recycling techniques for bioethanol production from lignocellulosic biomass. *Renewable and sustainable energy reviews*, *149*, 111370. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111370

[9] Jafari, H., Hejazi, S. R., & Rasti-Barzoki, M. (2017). Sustainable development by waste recycling under a three-echelon supply chain: A game-theoretic approach. *Journal of cleaner production*, *142*, 2252–2261. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.051

[10] Honma, S., & Hu, J.-L. (2021). Cost efficiency of recycling and waste disposal in Japan. *Journal of cleaner production*, *284*, 125274. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125274

[11] Martins, L. S., Guimarães, L. F., Junior, A. B. B., Tenório, J. A. S., & Espinosa, D. C. R. (2021). Electric car battery: An overview on global demand, recycling and future approaches towards sustainability. *Journal of environmental management*, *295*, 113091. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113091

[12] Mohammed, M., Wilson, D., Gomez-Kervin, E., Petsiuk, A., Dick, R., & Pearce, J. M. (2022). Sustainability and feasibility assessment of distributed E-waste recycling using additive manufacturing in a bi-continental context. *Additive manufacturing*, *50*, 102548. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102548

[13] Wu, H. (2022). Enhancements of sustainable plastics manufacturing through the proposed technologies of materials recycling and collection. *Sustainable materials and technologies*, *31*, e00376. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00376

[14] de Mello Soares, C. T., Ek, M., Östmark, E., Gällstedt, M., & Karlsson, S. (2022). Recycling of multi-material multilayer plastic packaging: Current trends and future scenarios. *Resources, conservation and recycling*, *176*, 105905. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105905

[15] Jafari, H. (2022). Investigating environmental and economic aspects of sustainability by recycling PET plastic bottles: A game-theoretic approach. *Clean technologies and environmental policy*, *24*, 829–842. https://doi.org/10.1007/s10098-021-02216-7

[16] Lombardi, M., Rana, R., & Fellner, J. (2021). Material flow analysis and sustainability of the Italian plastic packaging management. *Journal of cleaner production*, *287*, 125573. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125573

[17] Kamp, E., Musbahi, E., & Gupta, P. (2021). Topical treatment samples: plastic, recycling and sustainability. *Clinical and experimental dermatology*, *47*(1), 186-186. https://doi.org/10.1111/ced.14877

[18] Gradus, R. (2020). Postcollection separation of plastic recycling and design-for-recycling as solutions to low cost-effectiveness and plastic debris. *Sustainability*, *12*(20), 1–12. https://doi.org/10.3390/su12208415

[19] Jafari, H., Hejazi, S. R., & Rasti-Barzoki, M. (2016). Pricing decisions in dual-channel supply chain including monopolistic manufacturer and duopolistic retailers: a game-theoretic approach. *Journal of industry, competition and trade*, *16*, 323–343. https://doi.org/10.1007/s10842-016-0224-1

[20] Jafari, H., & Hejazi, S. R. (2017). Pricing decisions in dual-channel supply chain with one manufacturer and multiple retailers: A game-theoretic approach. *RAIRO-operations research-recherche opérationnelle*, *51*(4), 1269–1287.

[21] Nagurney, A. (2021). Supply chain game theory network modeling under labor constraints: Applications to the Covid-19 pandemic. *European journal of operational research*, *293*(3), 880–891.

[22] Rasti-Barzoki, M., Jafari, H., & Hejazi, S. R. (2017). Game-theoretic approach for pricing decisions in dual-channel supply chain. *International journal of industrial engineering & production research*, *28*(1), 1–8.

[23] Jafari, H., Hejazi, S. R., & Rasti-Barzoki, M. (2020). Game theoretical approach to price a product under two-echelon supply chain containing e-tail selling channel. *International journal of services and operations management*, *36*(2), 131–160.

[24] Jafari, H. (2021). Nurse scheduling problem by considering total number of required nurses as well as nurses' preferences for working shifts: An algorithmic game-theoretic approach. *Scientia iranica*. https://doi.org/10.24200/sci.2021.56780.4906

[25] Chen, P. C., Chiu, M. C., & Ma, H. (2016). Measuring the reduction limit of repeated recycling–a case study of the paper flow system. *Journal of cleaner production*, *132*, 98–107. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.023

[26] Sheu, J. B., & Chen, Y. J. (2012). Impact of government financial intervention on competition among green supply chains. *International journal of production economics*, *138*(1), 201–213.

[27] Dong, X., Li, C., Li, J., Wang, J., & Huang, W. (2010). A game-theoretic analysis of implementation of cleaner production policies in the Chinese electroplating industry. *Resources, conservation and recycling*, *54*(12), 1442–1448.

[28] Nagurney, A., & Woolley, T. (2010). Environmental and cost synergy in supply chain network integration in mergers and acquisitions. In *Multiple criteria decision making for sustainable energy and transportation systems* (pp. 57–78). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04045-0_6

[29] Nagurney, A., & Toyasaki, F. (2005). Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *41*(1), 1–28.

[30] Kreiger, M. A., Mulder, M. L., Glover, A. G., & Pearce, J. M. (2014). Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. *Journal of cleaner production*, *70*, 90–96. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009

[31] Liu, B., Zhang, R., & Xiao, M. (2010). Joint decision on production and pricing for online dual channel supply chain system. *Applied mathematical modelling*, *34*(12), 4208–4218.

[32] Jafari, H., Bateni, S., Daneshvar, P., Bateni, S., & Mahdioun, H. (2016). Fuzzy mathematical modeling approach for the nurse scheduling problem: a case study. *International journal of fuzzy systems*, *18*, 320–332. https://doi.org/10.1007/s40815-015-0051-2

[33] Moosaei, H., Ketabchi, S., & Jafari, H. (2015). Minimum norm solution of the absolute value equations via simulated annealing algorithm. *Afrika matematika*, *26*, 1221–1228.

[34] Jafari, H., & Haleh, H. (2021). Nurse scheduling problem by considering fuzzy modeling approach to treat uncertainty on nurses' preferences for working shifts and weekends off. *Journal of optimization in industrial engineering*, *14*(1), 69–78.