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. 4 (2023) 844–860.

Paper Type: Original Article

A Game-Theoretic Approach to Select a Channel for Supplying Required Materials in Producing a Product Manufactured from Recyclables

Hamed Jafari*

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

Citation:

Jafari, H. (2023). A game-theoretic approach to select a channel for supplying required materials in producing a product manufactured from recyclables. *Journal of decisions and operations research, 8*(4), 844-860.

Received: 17/07/2022 Reviewed: 20/08/2022 Revised: 09/09/2022 Accepted: 01/11/2022

Abstract

Purpose: In this research, a recyclable waste is used to manufacture a specific product. For this reason, a supply chain is considered containing manufacturer, recycler, and waste warehouse. First, the customers' demand for the considered product is determined based on its price. Then, the manufacturer produces it from a waste with specific recyclability rate. The waste warehouse collects the waste and the recycler recycles it. The manufacturer meets his requirements through two different channels. He can procure the non-recycled waste from the waste warehouse and then recycles it himself, or can buy the recycled waste from the recycler. The manufacturer selects these channels based on the established situations.

Methodology: The game theory is applied to make the decisions under two considered channels. In this setting, a Stackelberg game is developed based on the competitive situation established among the members, where the manufacturer has higher decision power than the waste warehouse and recycler.

Findings: Eventually, the given strategies are discussed and the obtained results are presented. Results indicate that the manufacturer selects each channel as a threshold is met. Moreover, more recyclability rate of the considered waste leads to higher profits for the members.

Originality/Value: In this research, to provide the waste materials required for producing a product, the game-theoretic approach as well as the concept of the channel-selection are used. It can be stated that this issue has been proposed for the first time in the literature.

Keywords: Sustainability, Recyclable waste, Supply chain management, Channel selection, Game theory.

Corresponding Author: hamed.jafari@iut.ac.ir

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 (۴)، (۱۴۰۲)، ۸۶۰-۸۴۴

www.journal-dmor.ir

نوع مقاله: پژوهشی

رویکرد نظریه بازی برای انتخاب کانال تامین مواد اولیه موردنیاز برای تولید یک محصول ساخته‌شده از مواد بازیافتی

حامد جعفری*

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

چکیده

هدف: در این تحقیق از یک نوع ضایعات بازیافتی برای تولید یک محصول خاص استفاده می‌گردد. بدین منظور زنجیره‌تامینی شامل تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات در نظر گرفته می‌شود. ابتدا تقاضای محصول در بازار بر اساس قیمت آن تعیین می‌گردد، سپس تولیدکننده برای برآوردن تقاضای مشتریان و تولید محصول، از یک نوع ضایعات بازیافتی با نرخ بازیافت‌پذیری مشخص استفاده می‌نماید. انبار ضایعات، مواد بازیافتی را جمع‌آوری نموده و بازیافت‌کننده آن‌ها را بازیافت می‌کند. تولیدکننده می‌تواند مواد بازیافتی موردنیاز خود را از دو کانال مختلف تهیه کند. وی می‌تواند ضایعات بازیافتی موردنیاز خود را به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت و مورداستفاده قرار دهد یا این‌که این مواد را به‌صورت بازیافت‌شده از بازیافت‌کننده تهیه کند. در واقع تولیدکننده با توجه به شرایط موجود، یکی از این دو کانال را انتخاب خواهد نمود.

روش‌شناسی پژوهش: برای اتخاذ تصمیمات تحت هرکدام از کانال‌های ایجادشده، از رویکرد نظریه بازی استفاده می‌شود. بدین منظور برای یافتن جواب مساله تحت رقابت ایجادشده، بازی استکلبرگ که در آن تولیدکننده دارای قدرت تصمیم‌گیری بیش‌تر و انبار ضایعات و بازیافت‌کننده دارای قدرت‌های تصمیم‌گیری کم‌تری هستند، به‌کار گرفته می‌شود.

یافته‌ها: در نهایت استراتژی‌های تعیین‌شده مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج به‌دست‌آمده ارایه می‌گردند. نتایج حاکی از آن هستند که تولیدکننده می‌تواند تحت یک شرایط مرزی هرکدام از دو کانال پیشنهادی را انتخاب نماید. هم‌چنین با افزایش نرخ بازیافت‌پذیری ضایعات مورداستفاده برای تولید محصول، سود اعضای زنجیره‌تامین مورد بررسی بهبود خواهند یافت.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: در این تحقیق به‌منظور تامین مواد اولیه ضایعاتی موردنیاز برای تولید محصولات از رویکرد نظریه بازی و مفهوم انتخاب کانال استفاده می‌گردد. می‌توان گفت که ایده استفاده از مفهوم انتخاب کانال برای تامین مواد اولیه ضایعاتی موردنیاز در تولید محصولات تحت زنجیره‌تامین موردبررسی، برای اولین بار در ادبیات موضوع مساله مطرح شده است.

کلیدواژه‌ها: توسعه پایدار، ضایعات بازیافتی، مدیریت زنجیره‌تامین، انتخاب کانال، نظریه بازی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با رشد مصرف منابع طبیعی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، مفاهیم پایداری و توسعه پایدار موردتوجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند [1]، [2]. توسعه پایدار شامل تمامی فعالیت‌ها و اقداماتی است که نیازمندی‌های نسل فعلی را بدون ایجاد هرگونه خسارت در برآوردن نیازمندی‌های نسل‌های بعدی برآورده می‌نمایند [3]. طراحی محصولات با در نظر گرفتن شرایط محیط‌زیست، تولید

* نویسنده مسئول

hamed.jafari@iut.ac.ir

محصولات سبز، استفاده مجدد از محصولات و بازیافت آن‌ها از جمله رویکردهای پیشنهادی برای توسعه پایداری هستند [4]، [5]. استفاده از مواد بازیافت‌پذیر و ضایعات بازیافتی برای تولید محصولات، رویکرد موثری برای بهبود شرایط پایداری است [6]. برخی فواید این رویکرد عبارت‌اند از: ایجاد محیطی پایدار برای نسل‌های آینده، کاهش آلودگی هوا، کاهش مصرف منابع طبیعی و ذخیره انرژی [7]، [8].

مدیریت زنجیره‌تامین برای بهبود عملکردها و اتخاذ تصمیمات مناسب در زنجیره‌تامین به مدیران کمک می‌کند [9]. زنجیره‌تامین می تواند به‌صورت مستقیم، معکوس یا دوطرفه باشد [10]. در زنجیره‌تامین مستقیم، اعضا برای تولید محصولات و تحویل آن‌ها به مشتریان تلاش می‌نمایند. در زنجیره‌تامین معکوس، محصولات فروخته‌شده برای استفاده در تولید از مشتریان جمع‌آوری می‌گردند. هم‌چنین در زنجیره‌تامین دوطرفه، محصولات تولیدشده به‌صورت مستقیم به مشتریان فروخته‌شده و سپس محصولات استفاده‌شده به‌صورت معکوس از آن‌ها پس گرفته‌شده و مورداستفاده مجدد قرار می‌گیرند [11].

نظریه بازی یک رویکرد ریاضی برای اتخاذ تصمیمات در شرایط تصمیم‌گیری با بیش از یک تصمیم‌گیرنده همراه با اهداف ناسازگار است [15]–[12]. در سال‌های اخیر این رویکرد به‌طور قابل ملاحظه‌ای برای اتخاذ تصمیمات در زنجیره‌تامین مورداستفاده قرار گرفته است. تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه پایداری و توسعه پایدار انجام شده‌اند؛ ولیکن مطالعات اندکی پایداری را از طریق تولید محصولات جدید با استفاده از ضایعات بازیافت‌پذیر با به‌کارگیری رویکرد نظریه بازی بررسی نموده‌اند که در ادامه این تحقیقات مرور خواهند شد.

ناگورنی و همکاران [16]، ناگورنی و لی [17] و ناگورنی و تویاساکی [18] از رویکرد نظریه بازی برای اتخاذ تصمیمات در زنجیره‌تامین ضایعات الکترونیکی استفاده نموده‌اند. سان و دبو [19] نشان داده‌اند که ایجاد روابط تکراری و بلندمدت در قیمت‌گذاری ضایعات بازیافتی می‌تواند به پایداری کمک کند. ناگورنی و یو [20] و وانگ و همکاران [21] مدل جدیدی برای بررسی رقابت میان جمع‌آوری کننده‌های دو نوع ضایعات بازیافتی ارایه داده‌اند. دونگ و همکاران [22] رقابت میان دو محصول تولیدشده از ضایعات بازیافت‌پذیر را تحت زنجیره‌تامینی شامل یک بازیافت‌کننده و دو تولیدکننده موردبررسی قرار داده‌اند. هم‌چنین چن و همکاران [23] زنجیره‌تامین بازیافت کاغذ را در تایوان موردبررسی قرار داده‌اند.

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، طراحی محصولات با توجه به شرایط محیط‌زیست از جمله رویکردهای مناسب برای توسعه پایداری است. در این میان طراحی محصولات جدید با سرمایه‌گذاری بر روی نرخ بازیافت‌پذیری آن‌ها تاثیر بسزایی در توسعه پایداری دارد [24]. کریکه و همکاران [25] و چن و شیو [26] تاثیر سرمایه‌گذاری بر روی نرخ بازیافت‌پذیری محصولات در توسعه پایداری را با استفاده از رویکرد نظریه بازی بررسی نموده‌اند. در سال‌های اخیر استفاده از ضایعات بازیافتی در صنایع نساجی برای تولید محصولات مختلف، توجه بسیاری از محققان و صنعتگران را به خود جلب نموده است [27]. در این میان جعفری [28] برای اتخاذ تصمیمات قیمت گذاری و سفارش‌دهی مربوط به ضایعات پلاستیکی در یک صنعت نساجی خاص از رویکرد نظریه بازی استفاده نموده است.

در این تحقیق به‌منظور توسعه پایداری، از ضایعات بازیافتی برای تولید یک محصول خاص تحت زنجیره‌تامینی شامل تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات استفاده می‌گردد. در واقع تولیدکننده برای برآوردن تقاضای مشتریان و تولید محصولات، از یک نوع ضایعات بازیافتی با نرخ بازیافت‌پذیری مشخص استفاده می‌نماید. انبار ضایعات، مواد ضایعاتی را جمع‌آوری نموده و بازیافت‌کننده آن ها را بازیافت می‌کند. تولیدکننده می‌تواند ضایعات بازیافتی موردنیاز خود را به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت و مورداستفاده قرار دهد یا این‌که این مواد را به‌صورت بازیافت‌شده از بازیافت‌کننده تهیه کند؛ بنابراین، تولیدکننده با توجه به شرایط موجود، یکی از این دو کانال را انتخاب خواهد نمود. هم‌چنین برای اتخاذ تصمیمات تحت هرکدام از کانال‌های ایجادشده، رویکرد نظریه بازی به‌کار گرفته خواهد شد.

جزییات مربوط به مقالات مرورشده و مقایسه تحقیق فعلی با این مقالات در **جدول ۱** ارایه شده‌اند.

جدول ۱- جزییات مقالات مرورشده.

Table 1- Details of the reviewed papers.

نویسندگان	محصول	تصمیم	بازی
ناگورنی و همکاران [12] ناگورنی و لی [17] ناگورنی و تویاساکی [18]	ضایعات الکترونیکی	قیمت‌گذاری	رقابتی همکارانه
سان و دبو [19]	مواد ضایعاتی (حالت کلی)	قیمت‌گذاری	رقابتی تکاملی
ناگورنی و یو [20] وانگ و همکاران [21] دونگ و همکاران [22]	مواد ضایعاتی (حالت کلی)	قیمت‌گذاری	رقابتی
چن و همکاران [23]	ضایعات کاغذی	قیمت‌گذاری بازیافت‌پذیری	رقابتی
کریکه و همکاران [25] چن و شیو [26]	مواد ضایعاتی در حالت کلی	بازیافت‌پذیری	رقابتی
جعفری [28]	صنعت نساجی	قیمت‌گذاری	رقابتی همکارانه
مطالعه فعلی	الیاف مصنوعی	قیمت‌گذاری انتخاب کانال	رقابتی

به‌طورکلی در این تحقیق سعی بر آن داریم تا با استفاده از رویکرد نظریه بازی و مفهوم انتخاب کانال، کانال مناسب برای تامین مواد اولیه ضایعاتی موردنیاز برای تولید محصولات را انتخاب نماییم. با توجه به مقالات مرورشده می‌توان گفت که در تحقیق فعلی ایده استفاده از مفهوم انتخاب کانال برای تامین مواد اولیه ضایعاتی موردنیاز در تولید محصولات تحت زنجیره‌تامین موردبررسی، برای اولین بار در ادبیات موضوع مساله مطرح شده است.

ساختار مقاله به‌صورت زیر است:

مساله موردبررسی در بخش ۲ توصیف می‌گردد. در بخش ۳ از رویکرد نظریه بازی برای اتخاذ تصمیمات استفاده خواهد شد. یک مثال عددی در بخش ۴ فراهم شده است. نتایج به‌دست‌آمده در بخش ۵ ارایه می‌شوند. در بخش ۶ دیدگاه‌های مدیریتی مربوط به نتایج حاصل فراهم می‌شوند. در نهایت بخش ۷ مربوط به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی خواهد بود.

۲- تعریف مساله

در این تحقیق تصمیمات قیمت‌گذاری و سفارش‌دهی یک نوع ضایعات بازیافتی به‌عنوان مواد اولیه موردنیاز برای تولید یک محصول خاص تحت زنجیره‌تامینی شامل تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات موردبررسی قرار خواهند گرفت.

در زنجیره‌تامین موردبررسی، ابتدا تقاضای محصول در بازار با توجه به قیمت آن تعیین می‌گردد. سپس تولیدکننده از یک نوع ضایعات بازیافتی با نرخ بازیافت‌پذیری مشخص برای تولید این محصول و تامین نیاز مشتریان استفاده می‌نماید. انبار ضایعات، مواد بازیافتی موردنیاز را جمع‌آوری نموده و بازیافت‌کننده آن‌ها را بازیافت می‌کند. براین‌اساس، تولیدکننده می‌تواند مواد ضایعاتی موردنیاز خود را از طریق دو کانال زیر تهیه کند:

کانال۱: تامین ضایعات موردنیاز به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات و بازیافت آن‌ها.

کانال۲: تامین ضایعات موردنیاز به‌صورت بازیافت‌شده از بازیافت‌کننده.

در واقع تولیدکننده با توجه به شرایط و هزینه‌های موجود، یکی از این دو کانال را برای تامین ضایعات بازیافتی موردنیاز خود انتخاب خواهد نمود. براین‌اساس دو مساله تصمیم‌گیری مختلف ایجاد می‌گردند. اگر تولیدکننده مواد ضایعاتی موردنیاز خود را از طریق کانال های ۱ یا ۲ تامین کند، به‌ترتیب مسایل تصمیم‌گیری ۱ و ۲ ایجاد خواهند شد.

تحت ساختار موردبررسی، انبار ضایعات قیمت مواد ضایعاتی جمع‌آوری‌شده را به تولیدکننده و بازیافت‌کننده اعلام می‌کند. بازیافت-کننده قیمت ضایعات بازیافت‌شده را برای تولیدکننده تعیین می‌کند. هم‌چنین تولیدکننده قیمت محصول نهایی را برای مشتریان مشخص می‌نماید. در بازگشت، تقاضای مشتریان به تولیدکننده برای محصول نهایی، تقاضای تولیدکننده به بازیافت‌کننده برای ضایعات بازیافت-شده، تقاضای تولیدکننده به انبار ضایعات برای مواد بازیافت‌نشده و تقاضای بازیافت‌کننده به انبار ضایعات برای مواد بازیافت‌نشده تعیین خواهند شد.

فرض می‌شود که مواد ضایعاتی موردبررسی دارای یک نرخ بازیافت‌پذیری مشخص است. نرخ بازیافت‌پذیری، نسبت مواد ضایعاتی بازیافت‌شده و قابل استفاده در تولید محصول به مواد ضایعاتی جمع‌آوری شده است. در واقع پس از بازیافت این ضایعات، بخشی از آن قابل استفاده نبوده و نمی‌تواند برای تولید محصول مورد استفاده قرار گیرد.

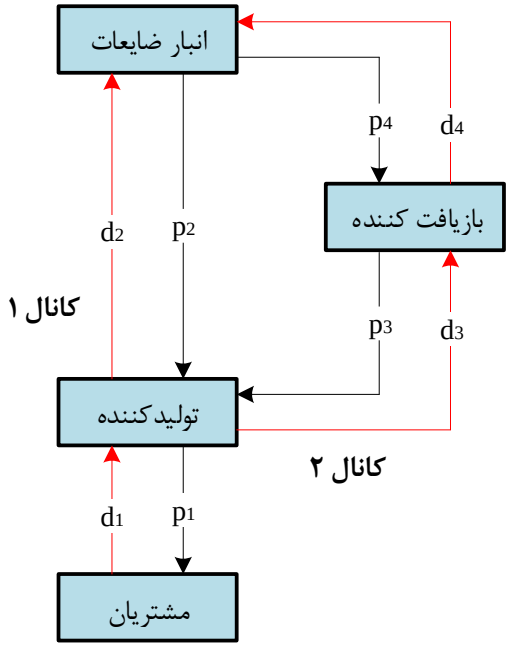
نمادهای مورد استفاده در مساله در **جدول ۲** ارایه شده‌اند.

جدول ۲- نمادهای مورد استفاده در مساله مطرح‌شده.
Table 2- Symbols used in the considered problem.

نماد	توصیف
	پارامترهای مساله
c_1	هزینه تولید یک واحد محصول نهایی برای تولیدکننده (صرف‌نظر از خرید مواد ضایعاتی موردنیاز) (تومان)
c_2	هزینه بازیافت هر تن مواد ضایعاتی بازیافت‌نشده برای تولیدکننده (تومان)
c_3	هزینه بازیافت هر تن مواد ضایعاتی بازیافت‌نشده برای بازیافت‌کننده (تومان)
c_4	هزینه جمع‌آوری هر تن مواد ضایعاتی برای انبار ضایعات (تومان)
γ	نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی
k	مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی (تن)
a	حداکثر تقاضای محصول نهایی در بازار (تن)
b	ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن
	متغیرهای تصمیم‌گیری مستقل
p_1	قیمت هر واحد محصول نهایی تعیین‌شده توسط تولیدکننده برای مشتریان (تومان)
p_2	قیمت هر تن ضایعات بازیافت‌نشده تعیین‌شده توسط انبار ضایعات برای تولیدکننده (تومان)
p_3	قیمت هر تن ضایعات بازیافت‌شده تعیین‌شده توسط بازیافت‌کننده برای تولیدکننده (تومان)
p_4	قیمت هر تن ضایعات بازیافت‌نشده تعیین‌شده توسط انبار ضایعات برای بازیافت‌کننده (تومان)
	متغیرهای تصمیم‌گیری وابسته
d_1	تقاضای مشتریان به تولیدکننده برای محصول نهایی (تن)
d_2	تقاضای تولیدکننده به انبار ضایعات برای مواد بازیافت‌نشده (تن)
d_3	تقاضای تولیدکننده به بازیافت‌کننده برای ضایعات بازیافت‌شده (تن)
d_4	تقاضای بازیافت‌کننده به انبار ضایعات برای مواد بازیافت‌نشده (تن)
u_1	مقدار سود تولیدکننده (تومان)
u_2	مقدار سود بازیافت‌کننده (تومان)
u_3	مقدار سود انبار ضایعات (تومان)

لازم به ذکر است که در مساله موردبررسی تنها از مواد اولیه ضایعاتی در تولید محصول استفاده می‌شود. در واقع مواد ضایعاتی ابتدا جمع‌آوری‌شده و سپس در تولید محصول مورداستفاده مجدد قرار می‌گیرد؛ بنابراین، زنجیره‌تامین موردبررسی در این تحقیق از نوع دوطرفه خواهد بود.

هم‌چنین ساختار مساله موردبررسی در **شکل ۱** نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار مساله موردبررسی.

Figure 1- Structure of the considered problem.

توابع تقاضای موردبررسی به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌گردند:

$$d_1 = a - bp_1. \quad (۱)$$

$$d_2 = \frac{k}{\gamma} d_1 = \frac{k}{\gamma}\ a - bp_1). \quad (۲)$$

$$d_3 = kd_1 = k\ a - bp_1). \quad (۳)$$

$$d_4 = \frac{1}{\gamma} d_3 = \frac{k}{\gamma} d_1 = \frac{k}{\gamma}\ a - bp_1). \quad (۴)$$

در **رابطه (۱)**، b برابر با تعداد مشتریانی است که به ازای یک واحد افزایش قیمت محصول نهایی از خرید آن منصرف می‌شوند. در واقع **رابطه (۱)** تقاضای محصول را نسبت به قیمت آن مشخص می‌نماید. k/γ مقدار مواد ضایعاتی بازیافت‌نشده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی است؛ بنابراین، مقدار کل تقاضای مواد ضایعاتی بازیافت‌نشده موردنیاز با استفاده از **رابطه (۲)** تعیین می‌گردد. k مقدار مواد ضایعاتی بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی است. با استفاده از **رابطه (۳)** مقدار کل تقاضای مواد ضایعاتی بازیافت‌شده نیز به‌دست خواهد آمد. **رابطه (۴)** نیز به‌همین ترتیب قابل توجیه است.

توابع سود مربوط به اعضای زنجیره‌تامین در نظر گرفته‌شده نیز به‌صورت زیر خواهند بود:

$$u_1 = \begin{cases} p_1 - c_1)d_1 - \ \ p_2 + c_2)d_2, & \text{در مساله ۱} \\ p_1 - c_1)d_1 - p_3 d_3\ . & \text{در مساله ۲} \end{cases} \quad (۵)$$

$$u_2 = \begin{cases} 0\ , & \text{در مساله ۱} \\ p_3 d_3 - \ p_4 + c_3)d_4. & \text{در مساله ۲} \end{cases} \quad (۶)$$

$$u_3 = \begin{cases} p_2 - c_4)d_2, & \text{در مساله ۱} \\ p_4 - c_4)d_4. & \text{در مساله ۲} \end{cases} \quad (۷)$$

با جای‌گذاری **توابع تقاضای (۱)** تا **(۴)** در **توابع سود (۵)** تا **(۷)**، سود اعضای زنجیره به‌صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$u_1 = \begin{cases} a - bp_1)\left(p_1 - \frac{k}{\gamma}p_2 - c_1 - \frac{k}{\gamma}c_2\right), & \text{مساله ۱} \\ a - bp_1)\ p_1 - kp_3 - c_1). & \text{مساله ۲} \end{cases} \quad (۸)$$

$$u_2 = \begin{cases} 0\,, & \text{در مساله ۱} \\ a - bp_1)\left(kp_3 - \frac{k}{\gamma}p_4 - \frac{k}{\gamma}c_3\right). & \text{در مساله ۲} \end{cases} \quad (۹)$$

$$u_3 = \begin{cases} \frac{k}{\gamma}\ a - bp_1)\ p_2 - c_4), & \text{در مساله ۱} \\ \frac{k}{\gamma}\ a - bp_1)\ p_4 - c_4). & \text{در مساله ۲} \end{cases} \quad (۱۰)$$

هم‌چنین به‌منظور شدنی بودن جواب‌های به‌دست‌آمده برای مسایل تصمیم‌گیری ۱ و ۲، به‌ترتیب **محدودیت‌های (۱۱)** و **(۱۲)** باید در نظر گرفته شوند:

$$\gamma p_1 \geq\ kp_2 + \gamma c_1 +\ kc_2,\ \ p_2 \geq c_4,\ \ a - bp_1 \geq 0. \quad (۱۱)$$

$$p_1 \geq kp_3 + c_1,\ \ \gamma p_3 \geq p_4 + c_3,\ \ p_4 \geq c_4,\qquad a - bp_1 \geq 0. \quad (۱۲)$$

محدودیت‌های تعیین‌شده در **رابطه (۱۱)** و **رابطه (۱۲)** تضمین می‌کنند که سود حاشیه‌ای اعضای زنجیره‌تامین و مقادیر تقاضای مربوط به محصول نهایی و مواد ضایعاتی در مسایل موردبررسی نامنفی هستند.

در بخش بعد برای اتخاذ تصمیمات موردبررسی از رویکرد نظریه بازی استفاده می‌گردد.

۳- رویکرد نظریه بازی

در این بخش اعضای زنجیره‌تامین در نظر گرفته‌شده (بازیکنان) برای تعیین قیمت‌های مربوط به محصول نهایی و مواد ضایعاتی در مسایل موردبررسی، از رویکرد نظریه بازی استفاده می‌کنند.

لازم به ذکر است با توجه به قدرت بیش‌تر تولیدکننده در بازار نسبت به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده، ابتدا تولیدکننده و سپس انبار ضایعات و بازیافت‌کننده تصمیمات خود را اتخاذ می‌نمایند. در واقع برای تعیین استراتژی‌های مربوط به هر بازیکن، بازی استکلبرگ به‌کار گرفته می‌شود که در آن تولیدکننده به‌عنوان رهبر بازی و انبار ضایعات و بازیافت‌کننده به‌عنوان پیرو تصمیمات اتخاذشده توسط رهبر، در نظر گرفته شده‌اند.

هم‌چنین تولیدکننده هنگامی در این بازی رقابتی شرکت می‌کند که سود تخصیص داده‌شده به وی حداقل دو برابر بیش‌تر از سودهای تخصیص داده‌شده به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده باشد. در واقع تولیدکننده به‌عنوان رهبر بازی انتظار دارد به‌طور قابل ملاحظه‌ای سود بیش‌تری نسبت به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده دریافت کند که این نسبت به‌صورت دو برابر در نظر گرفته شده است.

۳-۱- اتخاذ تصمیمات در مساله تصمیم‌گیری ۱

در این مساله، تولیدکننده مواد ضایعاتی موردنیاز خود را از طریق کانال ۱ تهیه می‌کند. در واقع وی برای برآوردن تقاضای مشتریان، مواد ضایعاتی موردنیاز را به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت می‌کند.

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در بازی استکلبرگ مربوط به مساله تصمیم‌گیری ۱، تولیدکننده به‌عنوان رهبر و انبار ضایعات به‌عنوان پیرو، استراتژی‌های خود را تعیین می‌کنند. در واقع ابتدا تولیدکننده با قدرت تصمیم‌گیری بیش‌تر، قیمت هر واحد محصول نهایی را برای مشتریان مشخص می‌نماید. سپس انبار ضایعات با قدرت تصمیم‌گیری کم‌تر، قیمت ضایعات بازیافت‌نشده را به تولیدکننده اعلام می کند. بازی استکلبرگ مربوط به مساله ۱ به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌گردد:

$$\begin{cases} \text{سطح اول: تعیین تصمیمات مربوط به بازیکن رهبر} \\ \max_{p_1} u_1 = (a - bp_1)\left(p_1 - \frac{k}{\gamma}p_2 - c_1 - \frac{k}{\gamma}c_2\right), \\ \text{سطح دوم: تعیین تصمیمات مربوط به بازیکن پیرو} \\ \max_{p_2} u_3 = \frac{k}{\gamma}(a - bp_1)(p_2 - c_4), \\ \text{محدودیت‌های مساله} \\ \gamma p_1 \geq kp_2 + \gamma c_1 + kc_2, p_2 \geq c_4, a - bp_1 \geq 0. \end{cases} \quad (۱۳)$$

اکنون سعی می‌کنیم جواب **مساله (۱۳)** را بیابیم. ابتدا با در اختیار داشتن قیمت مشخص‌شده توسط تولیدکننده برای محصول نهایی، انبار ضایعات قیمت ضایعات بازیافت‌نشده را برحسب قیمت محصول نهایی تعیین می‌کند.

لم ۱- تابع سود u_3 نسبت به p_2 به‌صورت خطی و صعودی است.

اثبات: با محاسبه مشتق‌های مرتبه اول و دوم تابع سود u_3 نسبت به p_2 داریم:

$$\begin{cases} \frac{du_3}{dp_2} = \frac{k}{\gamma}(a - bp_1) \geq 0, \\ \frac{d^2u_3}{d^2p_2} = 0. \end{cases} \quad (۱۴)$$

به‌وضوح با توجه به مشتق‌های مرتبه اول و دوم محاسبه‌شده در **رابطه (۱۴)** ثابت می‌گردد که u_3 نسبت به p_2 به‌صورت خطی و صعودی است.

برگرفته از **لم ۱** می‌توان گفت که از دیدگاه انبار ضایعات، حداکثر مقدار شدنی p_2 در جواب **مساله (۱۳)** انتخاب خواهد شد. با توجه به **رابطه (۱۱)**، محدودیت $\gamma p_1 \geq kp_2 + \gamma c_1 + kc_2$ باید در مساله در نظر گرفته شود. این محدودیت تضمین می‌کند که سود حاشیه‌ای تولیدکننده در مساله اول نامنفی است. با توجه به این رابطه، حداکثر مقدار شدنی برای p_2 برابر با $\frac{\gamma}{k}p_1 - \frac{\gamma}{k}c_1 - c_2$ خواهد بود. بنابراین از دیدگاه انبار ضایعات باید p_2 برابر با $\frac{\gamma}{k}p_1 - \frac{\gamma}{k}c_1 - c_2$ انتخاب گردد. در این شرایط بدیهی است که سود حاشیه‌ای تولیدکننده و در نتیجه مقدار سود تخصیص داده‌شده به وی در مساله ۱ برابر با صفر خواهند شد. این در شرایطی است که تولیدکننده رهبر این بازی است و انتظار می‌رود که مقدار سود تخصیص داده‌شده به وی در این بازی بیش‌تر از انبار ضایعات باشد. در واقع در این شرایط تولیدکننده انگیزه‌ای برای مشارکت در بازی ندارد. با توجه به توضیحات ارایه‌شده می‌توان گفت که در شرایط عادی نقطه تعادل این بازی در شرایطی تولید می‌گردد که تولیدکننده بدون هیچ سودی در بازی مشارکت کند؛ اما به‌نظر می‌رسد که تعادل به‌دست‌آمده منطقی نبوده و منجر به عدم تشکیل بازی می‌گردد. به‌همین دلیل فرض نمودیم که تولیدکننده زمانی در این بازی مشارکت می‌کند که سود تخصیص داده‌شده به وی حداقل دو برابر بیش‌تر از سود تخصیص داده‌شده به انبار ضایعات باشد. در واقع تعادل بازی در مساله ۱ با استفاده از این فرض تولید خواهد شد.

قضیه ۱- قیمت تعیین‌شده توسط انبار ضایعات برای ضایعات بازیافت‌نشده برحسب قیمت محصول نهایی مشخص‌شده توسط تولیدکننده به‌صورت زیر است:

$$p_2(p_1) = \frac{\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_2 + 2kc_4}{3k}. \quad (۱۵)$$

اثبات: همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده در بازی استکلبرگ حداقل دو برابر بیش‌تر از سود تخصیص داده‌شده به انبار ضایعات است؛ بنابراین $u_1 \geq 2u_3$ خواهد بود. با جای‌گذاری توابع سود بازیکنان در این رابطه و ساده‌سازی آن، رابطه $p_2 \leq (\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_2 + 2kc_4)/3k$ به‌دست می‌آید. با توجه به **لم ۱**، قیمت بهینه انبار ضایعات برای ضایعات بازیافت‌نشده برابر با $(\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_2 + 2kc_4)/3k$ به‌عنوان حداکثر مقدار شدنی آن است.

با جای‌گذاری $p_2(p_1)$ در تابع u_1، تابع سود جدید u_1' به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$u_1' = \frac{2(a - bp_1)(\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_2 - kc_4)}{3\gamma}. \quad (۱۶)$$

اکنون تولیدکننده قیمت محصول نهایی را با حداکثر نمودن تابع u_1' تعیین می‌کند.

لم ۲- تابع u_1' نسبت به p_1 به‌صورت اکید مقعر است.

اثبات داریم:

$$\begin{cases} \frac{du_1'}{dp_1} = \frac{2\ a\gamma + b\gamma c_1 + bkc_2 + bkc_4 - 2b\gamma p_1)}{3\gamma}, \\ \frac{d^2u_1'}{d^2p_1} = -\frac{4}{3}b < 0. \end{cases} \quad (۱۷)$$

چون مشتق مرتبه دوم منفی است، u_1' نسبت به p_1 به‌صورت اکید مقعر خواهد بود.

با توجه به **لم ۲** می‌توان نتیجه گرفت که تابع u_1' حداکثر دارای یک نقطه اکسترمم بوده و این نقطه در صورت وجود به شکل ماکزیمم است؛ بنابراین اگر جواب حاصل از حل مشتق مرتبه اول این تابع نسبت به p_1 شدنی باشد، آن‌گاه این جواب می‌تواند به‌عنوان استراتژی انتخاب‌شده توسط تولیدکننده در نظر گرفته شود.

قضیه ۲- قیمت‌های تعیین‌شده توسط تولیدکننده و انبار ضایعات به‌ترتیب برای محصول نهایی و ضایعات بازیافت‌نشده در مساله تصمیم گیری ۱ به‌صورت زیر هستند:

$$\begin{cases} {p_1}^1 = \frac{a\gamma + b\gamma c_1 + bkc_2 + bkc_4}{2b\gamma}, \\ {p_2}^1 = \frac{a\gamma - b\gamma c_1 - kbc_2 + 5kbc_4}{6bk}. \end{cases} \quad (۱۸)$$

اثبات: با حل مشتق مرتبه اول محاسبه‌شده در **رابطه (۱۷)** نسبت به p_1 و جای‌گذاری آن در **رابطه (۱۵)**، جواب **رابطه (۱۸)** به‌دست می‌آید. این جواب در محدودیت‌های ارایه‌شده در **رابطه (۱۱)** نیز صدق می‌کند. در واقع با جای‌گذاری قیمت‌های به‌دست‌آمده در **رابطه (۱۸)** در محدودیت‌های مربوط به **رابطه (۱۱)** ثابت می‌شود که این جواب شدنی است، اگر و تنها اگر رابطه $a\gamma \geq b\gamma c_1 + kbc_2 + kbc_4$ برقرار باشد. اکنون ثابت می‌کنیم که این رابطه برقرار است.

برگرفته از محدودیت‌های $\gamma p_1 \geq\ kp_2 + \gamma c_1 +\ kc_2$ و $p_2 \geq c_4$، حداقل مقدار ممکن برای تعیین قیمت p_1 برابر با $(kc_4 + \gamma c_1 +\ kc_2)/\gamma$ است. هنگامی‌که تولیدکننده حداقل مقدار ممکن را برای قیمت محصول نهایی در نظر می‌گیرد، انتظار می‌رود که تقاضای محصول نهایی نامنفی باشد و این یک فرض بدیهی است. با جای‌گذاری رابطه $p_1 = (kc_4 + \gamma c_1 +\ kc_2)/\gamma$ در تابع تقاضای $d_1 = a - bp_1$ به راحتی ثابت می‌گردد که $d_1 \geq 0$ است، اگر و تنها اگر رابطه $a\gamma \geq b\gamma c_1 + kbc_2 + kbc_4$ برقرار باشد و این اثبات **قضیه ۲** را تکمیل می‌نماید.

اکنون می‌توان با جای‌گذاری قیمت‌های به‌دست‌آمده در **رابطه (۱)** تا **رابطه (۴)**، مقادیر تقاضا در مساله ۱ را تعیین نمود.

قضیه ۳- تقاضای محصول نهایی سفارش داده‌شده توسط مشتریان به تولیدکننده و تقاضای مواد ضایعاتی بازیافت‌نشده تعیین‌شده توسط تولیدکننده به انبار ضایعات در مساله تصمیم‌گیری ۱ به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\begin{cases} {d_1}^1 = \frac{a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_2 - bkc_4}{2\gamma}, \\ {d_2}^1 = \frac{k\ a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_2 - bkc_4)}{2\gamma^2}. \end{cases} \quad (۱۹)$$

اثبات: مقادیر تقاضای محصول نهایی و مواد ضایعاتی بازیافت‌نشده، با جای‌گذاری قیمت‌های تعیین‌شده در **رابطه (۱۸)** در **رابطه (۱)** و **رابطه (۲)** محاسبه می‌شوند.

هم‌چنین با جای‌گذاری قیمت‌ها و تقاضاهای به‌دست‌آمده در **رابطه (۵)** تا **رابطه (۷)**، مقادیر سود اعضا در مساله ۱ نیز تعیین می‌شوند.

قضیه ۴- مقادیر سود مربوط به تولیدکننده و انبار ضایعات در مساله تصمیم‌گیری ۱ به‌صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} {u_1}^1 = \dfrac{a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_2 - bkc_4)^2}{6b\gamma^2}, \\ {u_3}^1 = \dfrac{a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_2 - bkc_4)^2}{12b\gamma^2}. \end{cases} \quad (۲۰)$$

اثبات: مقادیر سود تولیدکننده و انبار ضایعات، با جای‌گذاری **رابطه (۱۸)** در **رابطه (۵)** و **رابطه (۷)** تعیین می‌شوند.

۲-۳- اتخاذ تصمیمات در مساله تصمیم‌گیری ۲

در مساله تصمیم‌گیری ۲، تولیدکننده مواد ضایعاتی موردنیاز خود را از طریق کانال ۲ تهیه می‌کند. به‌عبارت دیگر تولیدکننده برای برآوردن تقاضای مشتریان، مواد ضایعاتی موردنیاز خود را به‌صورت بازیافت‌شده از بازیافت‌کننده خریداری می‌کند. هم‌چنین بازیافت‌کننده برای تامین مواد ضایعاتی موردنیاز خود، آن‌ها را به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات خریداری و سپس بازیافت می‌نماید.

در بازی استکلبرگ مربوط به مساله ۲، تولیدکننده به‌عنوان رهبر و بازیافت‌کننده و انبار ضایعات به‌عنوان پیرو، تصمیمات خود را اتخاذ می‌کنند. در واقع ابتدا تولیدکننده با قدرت تصمیم‌گیری بیش‌تر، قیمت هر واحد محصول نهایی را برای مشتریان مشخص می‌کند. سپس بازیافت‌کننده و انبار ضایعات با قدرت تصمیم‌گیری کم‌تر، قیمت‌های خود را اعلام می‌نمایند. به‌عبارت دیگر بازیافت‌کننده، قیمت ضایعات بازیافت‌شده را برای تولیدکننده و انبار ضایعات، قیمت ضایعات بازیافت‌نشده را برای بازیافت‌کننده تعیین می‌کنند. بازی استکلبرگ مربوط به مساله تصمیم‌گیری ۲ به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{cases} \text{سطح اول: تعیین تصمیمات مربوط به بازیکن رهبر} \\ \max\limits_{p_1} \ u_1 = \ a - bp_1)\ p_1 - kp_3 - c_1)\ , \\ \text{سطح دوم: تعیین تصمیمات مربوط به بازیکنان پیرو} \\ \max\limits_{p_3} \ u_2 = \ a - bp_1)\left(kp_3 - \dfrac{k}{\gamma}p_4 - \dfrac{k}{\gamma}c_3\right), \\ \max\limits_{p_4} \ u_3 = \dfrac{k}{\gamma}\ a - bp_1)\ p_4 - c_4), \\ \text{محدودیت‌های مساله} \\ p_1 \geq kp_3 + c_1, \gamma p_3 \geq p_4 + c_3, p_4 \geq c_4, a - bp_1 \geq 0. \end{cases} \quad (۲۱)$$

ابتدا با دانستن قیمت محصول نهایی مشخص‌شده توسط تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات به‌ترتیب قیمت ضایعات بازیافت‌شده و قیمت ضایعات بازیافت‌نشده را تعیین می‌کنند.

لم ۳- توابع u_2 و u_3 به‌ترتیب نسبت به قیمت‌های p_3 و p_4 به‌صورت خطی و صعودی هستند.

اثبات داریم:

$$\begin{cases} \dfrac{du_2}{dp_3} = k\ a - bp_1) \geq 0, \\ \dfrac{d^2u_2}{d^2p_3} = 0. \end{cases} \quad (۲۲)$$

$$\begin{cases} \dfrac{du_3}{dp_4} = \dfrac{k}{\gamma}\ a - bp_1) \geq 0, \\ \dfrac{d^2u_3}{d^2p_4} = 0\ . \end{cases} \quad (۲۳)$$

با توجه به مشتق‌های مرتبه اول و دوم محاسبه‌شده در **رابطه (۲۲)** و **رابطه (۲۳)**، به‌وضوح u_2 و u_3 به‌ترتیب نسبت به p_3 و p_4 به‌صورت خطی و صعودی هستند.

بنابراین می‌توان گفت که از دیدگاه بازیافت‌کننده و انبار ضایعات، حداکثر مقادیر شدنی p_3 و p_4 باید در جواب **مساله (۲۱)** در نظر گرفته شوند. با توضیحاتی مشابه به آن‌چه در بخش ۱-۳ ذکر شد، از این فرض که سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده حداقل دو برابر بیش‌تر از سودهای تخصیص داده‌شده به انبار ضایعات و بازیافت‌کننده است، برای تولید تعادل در مساله ۲ استفاده می‌گردد.

قضیه ۵- قیمت تعیین‌شده توسط بازیافت‌کننده برای ضایعات بازیافت‌شده و قیمت تعیین‌شده توسط انبار ضایعات برای ضایعات بازیافت‌نشده برحسب قیمت محصول نهایی به‌صورت زیر هستند:

$$\begin{cases} p_3\ p_1) = \dfrac{\gamma p_1 - \gamma c_1 + kc_3 + kc_4}{2k\gamma}, \\ p_4\ p_1) = \dfrac{\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_3 + 3kc_4}{4k}. \end{cases} \qquad (۲۴)$$

اثبات: سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده در بازی استکلبرگ حداقل دو برابر بیش‌تر از سودهای تخصیص داده‌شده به بازیافت‌کننده و انبار ضایعات است. در نتیجه روابط $u_1 \geq 2u_2$ و $u_1 \geq ۲u_3$ در مساله تصمیم‌گیری ۲ برقرار هستند. با جای‌گذاری توابع سود بازیکنان در این روابط و ساده‌سازی آن‌ها، روابط $p_3 \leq (\gamma p_1 - \gamma c_1 + 2kc_3 + 2kp_4)/3k\gamma$ و $p_4 \leq (\gamma p_1 - \gamma c_1 + 2kc_4 - k\gamma p_3)/2k$ حاصل می شوند. با توجه به **لم ۳**، قیمت تعیین‌شده توسط بازیافت‌کننده برای ضایعات بازیافت‌شده و قیمت تعیین‌شده توسط انبار ضایعات برای ضایعات بازیافت‌نشده به‌ترتیب برابر با $(\gamma p_1 - \gamma c_1 + 2kc_3 + 2kp_4)/3k\gamma$ و $(\gamma p_1 - \gamma c_1 + 2kc_4 - k\gamma p_3)/2k$ به‌عنوان حداکثر مقادیر شدنی آن‌ها خواهند بود. با حل هم‌زمان روابط $p_3 = (\gamma p_1 - \gamma c_1 + 2kc_3 + 2kp_4)/3k\gamma$ و $p_4 = (\gamma p_1 - \gamma c_1 + 2kc_4 - k\gamma p_3)/2k$، **رابطه (۲۴)** به‌دست می‌آید.

تابع سود جدید u_1'' با جای‌گذاری $p_3(p_1)$ و $p_4(p_1)$ در تابع u_1 به‌صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$u_1'' = \frac{a - bp_1)\ \gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_3 - kc_4)}{2\gamma}. \qquad (۲۵)$$

اکنون تولیدکننده قیمت محصول نهایی را با حداکثر کردن تابع سود u_1'' مشخص می‌نماید.

لم ۴- تابع سود جدید u_1'' نسبت به p_1 به‌صورت اکید مقعر است.

اثبات: با محاسبه مشتق‌های مرتبه اول و دوم تابع u_1'' نسبت به p_1 داریم:

$$\begin{cases} \dfrac{du_1''}{dp_1} = \dfrac{a\gamma + b\gamma c_1 + bkc_3 + bkc_4 - 2b\gamma p_1}{2\gamma}, \\ \dfrac{d^2u_1''}{d^2p_1} = -b < 0. \end{cases} \qquad (۲۶)$$

به‌وضوح u_1'' نسبت به p_1 به‌صورت اکید مقعر است.

به‌عنوان نتیجه، تابع u_1'' حداکثر دارای یک نقطه اکسترمم بوده و این نقطه در صورت وجود به شکل ماکزیمم است؛ بنابراین، می‌توان گفت که اگر جواب حاصل از حل مشتق مرتبه اول شدنی باشد، آن‌گاه این جواب به‌عنوان استراتژی تعیین‌شده توسط تولیدکننده در مساله ۲ در نظر گرفته خواهد شد.

قضیه ۶- قیمت تعیین‌شده توسط تولیدکننده برای محصول نهایی، قیمت تعیین‌شده توسط بازیافت‌کننده برای ضایعات بازیافت‌شده و قیمت تعیین‌شده توسط انبار ضایعات برای ضایعات بازیافت‌نشده در مساله تصمیم‌گیری ۲ به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\begin{cases} {p_1}^2 = \dfrac{a\gamma + b\gamma c_1 + bkc_3 + bkc_4}{2b\gamma}, \\ {p_3}^2 = \dfrac{a\gamma - b\gamma c_1 + 3bkc_3 + 3bkc_4}{4bk\gamma}, \\ {p_4}^2 = \dfrac{a\gamma - b\gamma c_1 + bkc_3 - 7bkc_4}{8bk}. \end{cases} \qquad (۲۷)$$

اثبات: با حل مشتق مرتبه اول ارایه‌شده در **رابطه (۲۶)** نسبت به p_1 و جای‌گذاری آن در **رابطه (۲۴)**، جواب **رابطه (۲۷)** حاصل می‌شود. این جواب در محدودیت‌های مربوط به **رابطه (۱۲)** نیز صادق است. با جای‌گذاری قیمت‌های تعیین‌شده در **رابطه (۲۷)** در

محدودیت‌های مربوط به **رابطه (۱۲)** ثابت می‌گردد که جواب **رابطه (۲۷)** شدنی است، اگر و تنها اگر رابطه $a\gamma \geq b\gamma c_1 + kbc_3 + kbc_4$ برقرار باشد. با روندی مشابه با آن‌چه در اثبات **قضیه ۲** ارایه شد، می‌توان گفت که رابطه مذکور برقرار است.

با جای‌گذاری قیمت‌های به‌دست‌آمده در **رابطه (۱)** تا **رابطه (۴)**، مقادیر تقاضا در مساله ۲ به‌دست خواهند آمد.

قضیه ۷- تقاضای محصول نهایی سفارش داده‌شده توسط مشتریان به تولیدکننده، تقاضای ضایعات بازیافت‌شده تعیین‌شده توسط تولیدکننده به بازیافت‌کننده و تقاضای ضایعات بازیافت‌نشده تعیین‌شده توسط بازیافت‌کننده به انبار ضایعات در مساله تصمیم‌گیری ۲ به‌صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} {d_1}^2 = \dfrac{a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_3 - bkc_4}{2\gamma}, \\ {d_3}^2 = \dfrac{k\ a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_3 - bkc_4)}{2\gamma}, \\ {d_4}^2 = \dfrac{k\ a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_3 - bkc_4)}{2\gamma^2}. \end{cases} \quad (۲۸)$$

اثبات: مقادیر تقاضای مربوط به مساله ۲، با جای‌گذاری قیمت‌های محاسبه‌شده در **رابطه (۲۷)** در **رابطه‌های (۱)، (۳)** و **(۴)** حاصل می‌شوند.

اکنون می‌توان با جای‌گذاری قیمت‌ها و تقاضاهای به‌دست‌آمده در **رابطه (۵)** تا **رابطه (۷)**، مقادیر سود اعضا را در مساله ۲ تعیین نمود.

قضیه ۸- مقادیر سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات در مساله تصمیم‌گیری ۲ به‌صورت زیر هستند:

$$\begin{cases} {u_1}^2 = \dfrac{a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_3 - bkc_4)^2}{8b\gamma^2}, \\ {u_2}^2 = \dfrac{a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_3 - bkc_4)^2}{16b\gamma^2}, \\ {u_3}^2 = \dfrac{a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_3 - bkc_4)^2}{16b\gamma^2}. \end{cases} \quad (۲۹)$$

اثبات: با جای‌گذاری **رابطه (۲۷)** در **رابطه‌های (۵) (۷)**، مقادیر سود اعضای زنجیره‌تامین به‌دست خواهند آمد.

۴- مثال عددی

امروزه با توجه به کمبود منابع طبیعی پنبه، از برخی مواد ضایعاتی بازیافت‌پذیر در صنعت نساجی استفاده می‌شود. می‌توان گفت که در سال‌های اخیر بسیاری از شرکت‌های موجود در صنعت نساجی از جمله تولیدکننده‌های فرش، موکت و پوشاک به‌جای پنبه از الیاف‌مصنوعی تهیه‌شده از مواد پلاستیکی بازیافت‌پذیر برای تولید محصولات خود استفاده می‌کنند [29]. با توجه به ارزان‌تر بودن الیاف مصنوعی نسبت به پنبه، استفاده از این فرآیند برای تولیدکننده‌ها مقرون‌به‌صرفه است. هم‌چنین جمع‌آوری، بازیافت و استفاده مجدد از مواد پلاستیکی بازیافت‌پذیر، اثرات مطلوب زیست‌محیطی را نیز به‌همراه خواهد داشت [28]. بدین منظور، در این بخش برای تشریح مسایل در نظر گرفته شده در تحقیق فعلی، یک مثال عددی در صنعت نساجی ارایه می‌گردد.

یک تولیدکننده الیاف مصنوعی را در نظر بگیرید که از مواد پلاستیکی بازیافت‌پذیر برای تولید محصولات خود استفاده می‌نماید. وی می‌تواند مواد پلاستیکی موردنیاز خود را به‌صورت بازیافت‌نشده از یک انبار ضایعات پلاستیکی خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت کند یا این‌که این مواد را به‌صورت بازیافت‌شده از یک کارخانه بازیافت تهیه کند. در واقع تولیدکننده قادر است که مواد پلاستیکی بازیافت نشده را بازیافت نماید.

هزینه تولید هر تن الیاف مصنوعی برای تولیدکننده برابر با $c_1 = ۱۰۰۰۰۰۰$ تومان، هزینه بازیافت هر تن مواد پلاستیکی بازیافت‌نشده برای تولیدکننده برابر با $c_2 = ۵۰۰۰۰۰۰$ تومان، هزینه بازیافت هر تن مواد پلاستیکی بازیافت‌نشده برای کارخانه بازیافت برابر با $c_3 = ۳۵۰۰۰۰۰$ تومان و هزینه جمع‌آوری هر تن مواد پلاستیکی برای انبار ضایعات برابر با $c_4 = ۲۰۰۰۰۰۰$ تومان تخمین زده شده‌اند. برای تولید هر تن الیاف مصنوعی $k = ۳$ تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده موردنیاز بوده و نرخ بازیافت‌پذیری ضایعات پلاستیکی مورداستفاده برابر با

$\gamma = ۰/۷$ است. حداکثر تقاضای مشتریان در بازار برای الیاف مصنوعی تولیدشده برابر با $a = ۲۰۰۰۰۰۰$ تن بوده و ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن برابر با $b = ۰/۰۳$ برآورد شده است.

نتایج مربوط به جواب‌های به‌دست‌آمده برای مسایل تصمیم‌گیری ۱ و ۲ تحت مثال عددی موردبررسی در **جدول ۳** خلاصه شده‌اند. با توجه به **جدول ۳**، مقدار سود تولیدکننده در مساله ۲ بیش‌تر از مساله ۱ است؛ بنابراین، می‌توان گفت که از دیدگاه تولیدکننده بهتر است مواد پلاستیکی ضایعاتی موردنیاز به‌صورت بازیافت‌شده از کارخانه بازیافت خریداری شود.

جدول ۳- نتایج مربوط به مثال عددی موردبررسی.

Table 3- Results for the investigated numerical example.

عنوان	جواب مساله ۱	جواب مساله ۲
قیمت هر تن الیاف مصنوعی (تومان)	53333333	50119000
قیمت هرتن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده (تومان)	-	10615100
قیمت هر تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده (تومان)	3037037	2965280
تقاضای الیاف مصنوعی (تن)	400000	496429
تقاضای ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده (تن)	-	1489290
تقاضای ضایعات پلاستیکی بازیافت‌نشده (تن)	1714285	2127550
سود تولیدکننده (تومان)	355555555555	410735544222
سود کارخانه بازیافت (تومان)	-	205367772111
سود انبار ضایعات (تومان)	177777777777	205367772111

۵- نتایج و یافته‌ها

در این بخش نتایج به‌دست‌آمده از حل مسایل تعریف‌شده، مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

ابتدا تعیین می‌کنیم که از دیدگاه تولیدکننده بهتر است کدام‌یک از کانال‌های ۱ (تامین مواد ضایعاتی موردنیاز به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات و بازیافت آن‌ها) یا کانال ۲ (تامین مواد ضایعاتی موردنیاز به‌صورت بازیافت‌شده از بازیافت‌کننده) انتخاب گردند.

نتیجه ۱: با توجه به مقادیر سود تخصیص داده‌شده به تولیدکننده در مسایل تصمیم‌گیری ۱ و ۲، رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$u_1^1 \geq u_1^2 \quad \text{اگر و تنها اگر} \quad c_2 \leq v. \qquad (۳۰)$$

که در آن داریم:

$$v = \frac{\left(2\sqrt{3}-3\right)\gamma a - b\gamma c_1 - bkc_4) + 3bkc_3}{2\sqrt{3}bk}. \qquad (۳۱)$$

رابطه (۳۰) با توجه به مقادیر سود تولیدکننده در مسایل تصمیم‌گیری ۱ و ۲ به‌دست می‌آید.

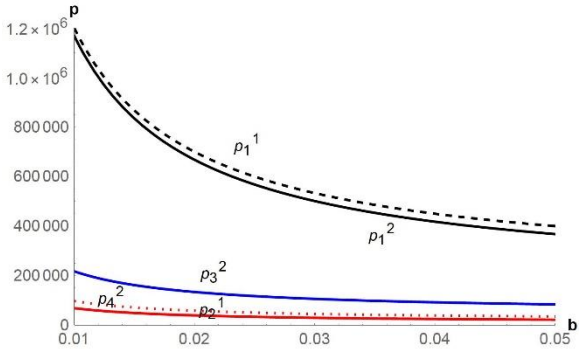
نتیجه ۲: برای تقاضای محصول نهایی تعیین‌شده توسط مشتریان در مسایل تصمیم‌گیری ۱ و ۲، داریم:

$$p_1^1 \geq p_1^2 \quad \text{اگر و تنها اگر} \quad c_2 \geq c_3. \qquad (۳۲)$$

رابطه (۳۲) با مقایسه قیمت محصول نهایی در مسایل ۱ و ۲ به‌دست می‌آید.

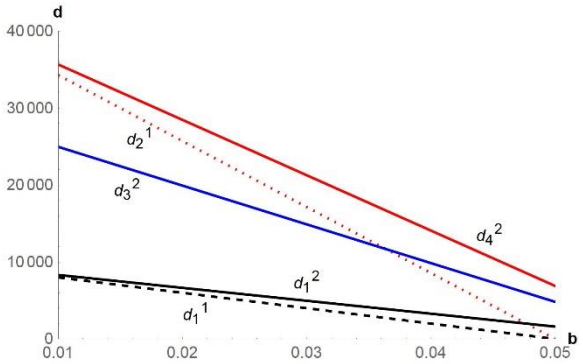
در ادامه یک تحلیل حساسیت بر روی برخی پارامترهای در نظر گرفته‌شده انجام خواهد شد تا تاثیر آن‌ها را بر روی قیمت‌ها، تقاضاها و سودهای به‌دست‌آمده در کانال‌های ۱ و ۲ تعیین کنیم. بدین منظور از مقادیر پارامترهای مربوط به مثال عددی ارایه‌شده در بخش ۴ استفاده می‌گردد.

تاثیر تغییرات ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن (b) بر روی قیمت‌ها، تقاضاها و سودهای حاصل از مسایل موردبررسی به‌ترتیب در **شکل‌های ۲**، **۳** و **٤** نشان داده شده‌اند.



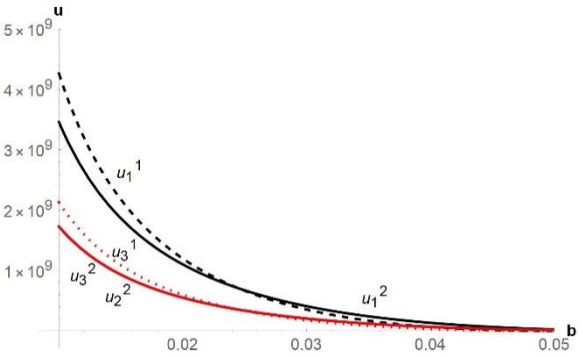
شکل ۲- تغییرات قیمت‌ها نسبت به b.

Figure 2- Changes of the prices in regard to b.



شکل ۳- تغییرات تقاضاها نسبت به b.

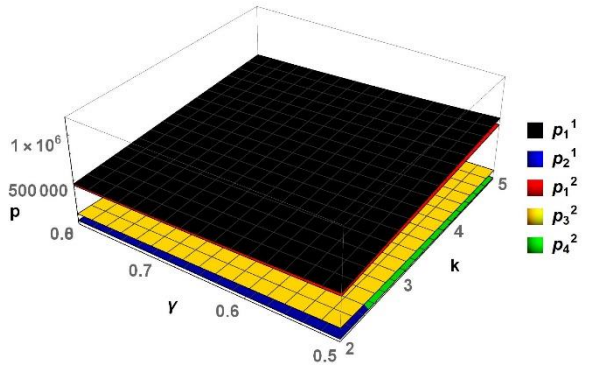
Figure 3- Changes of the demands in regard to b.



شکل ۴- تغییرات سودها نسبت به b.

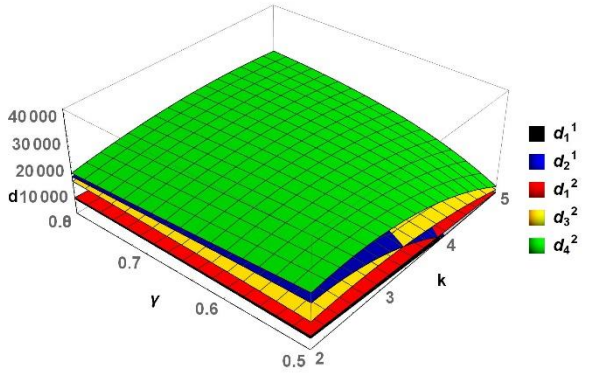
Figure 4- Changes of the profits in regard to b.

هم‌چنین نحوه تغییرات قیمت‌ها، تقاضاها و سودها نسبت به تغییرات هم‌زمان مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی (k) و نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی (γ) به‌ترتیب در **شکل ۵** تا **شکل ۷** نشان داده شده‌اند.



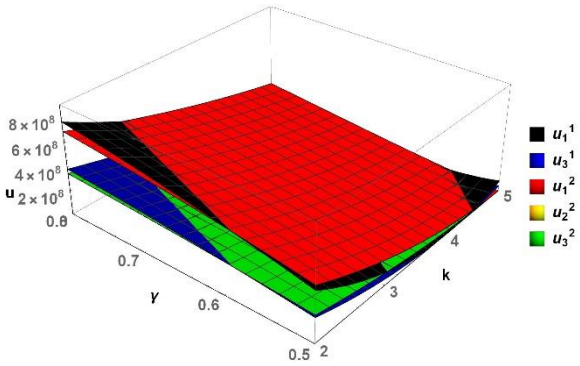
شکل ۵- تغییرات قیمت‌ها نسبت به k و γ.

Figure 5- Changes of the prices in regard to k and γ.



شکل ۶ - تغییرات تقاضاها نسبت به k و γ.

Figure 6- Changes of the demands in regard to k and γ.



شکل ۷- تغییرات سودها نسبت به k و γ.

Figure 7- Changes of the profits in regard to k and γ.

۶- دیدگاه‌های مدیریتی

در این بخش دیدگاه‌های مدیریتی مربوط به نتایج ارایه‌شده در بخش ۵ فراهم خواهند شد. براین‌اساس داریم:

دیدگاه مدیریتی ۱ (برگرفته از نتیجه ۱): از دیدگاه تولیدکننده مقرون‌به‌صرفه است که وی مواد ضایعاتی موردنیاز خود را به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت کند، اگر و تنها اگر هزینه بازیافت مواد ضایعاتی برای تولیدکننده از یک مقدار مشخص v بیش‌تر نباشد.

دیدگاه مدیریتی ۲ (برگرفته از نتیجه ۲): هنگامی‌که هزینه بازیافت مواد ضایعاتی برای تولیدکننده کم‌تر از هزینه بازیافت برای بازیافت کننده باشد، تقاضای محصول نهایی در حالتی که تولیدکننده مواد ضایعاتی موردنیاز خود را به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت کند، بیش‌تر از حالتی است که وی این مواد را به‌صورت بازیافت‌شده از بازیافت‌کننده می‌خرد.

دیدگاه مدیریتی ۳ (برگرفته از نتیجه ۳): وقتی هزینه بازیافت مواد ضایعاتی برای تولیدکننده بیش‌تر از هزینه بازیافت برای بازیافت‌کننده است، قیمت محصول در حالتی که تولیدکننده مواد ضایعاتی موردنیاز خود را به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات خریداری و بازیافت می‌کند، بیش‌تر از حالتی است که وی این مواد را به‌صورت بازیافت‌شده از بازیافت‌کننده خریداری می‌نماید.

دیدگاه مدیریتی ۴ (برگرفته از تحلیل حساسیت تصمیمات نسبت به ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی): با توجه به **شکل ۲**، با افزایش ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نسبت به قیمت آن، قیمت‌های تعیین‌شده توسط اعضای زنجیره‌تامین کاهش می‌یابند. در واقع هنگامی‌که ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن افزایش می‌یابد، تولیدکننده قیمت محصول نهایی را کاهش می‌دهد تا مشتریان کم‌تری را از دست دهد و به‌تبع آن سایرین نیز مجبورند قیمت خود را کم‌تر تعیین نمایند.

دیدگاه مدیریتی ۵ (برگرفته از تحلیل حساسیت مقادیر تقاضا نسبت به ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی): با توجه به **شکل ۳**، افزایش ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن منجر به کاهش تقاضای محصول نهایی و در نتیجه تقاضای مواد ضایعاتی می‌گردد.

دیدگاه مدیریتی ۶ (برگرفته از تحلیل حساسیت مقادیر سود نسبت به ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی): با توجه به **شکل ۴**، با افزایش ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن، سود اعضای زنجیره‌تامین موردبررسی کاهش خواهند یافت. به‌وضوح هنگامی‌که ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن افزایش می‌یابد، مقادیر سود اعضای زنجیره‌تامین نیز با توجه به کاهش قیمت‌ها و تقاضاها، کاهش خواهند یافت.

دیدگاه مدیریتی ۷ (برگرفته از تحلیل حساسیت تصمیمات نسبت به مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز و نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی): با توجه به **شکل ۵**، با افزایش مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی یا با کاهش نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی، قیمت‌های اعلام‌شده در مسایل موردبررسی افزایش می‌یابند.

دیدگاه مدیریتی ۸ (برگرفته از تحلیل حساسیت مقادیر تقاضا نسبت به مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز و نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی): با توجه به **شکل ۶**، هنگامی‌که مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی و نرخ بازیافت پذیری مواد ضایعاتی هر دو به‌صورت هم‌زمان افزایش می‌یابند، تقاضای محصول نهایی و مواد ضایعاتی نیز افزایش پیدا می‌کنند. با افزایش مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی و با کاهش نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی، تقاضاها کاهش می‌یابند. کاهش مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی و افزایش نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی منجر به افزایش تقاضای محصول نهایی و مواد ضایعاتی بازیافت‌شده و کاهش تقاضای مواد ضایعاتی بازیافت‌نشده می‌شوند. هم‌چنین با کاهش هم‌زمان این پارامترها تقاضای مواد ضایعاتی بازیافت‌نشده افزایش خواهد یافت، درصورتی‌که در این حالت نمی‌توان نتیجه صریحی در مورد تقاضای محصول نهایی و مواد ضایعاتی بازیافت‌شده بیان نمود.

دیدگاه مدیریتی ۹ (برگرفته از تحلیل حساسیت مقادیر سود نسبت به مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز و نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی): با توجه به **شکل ۷**، با کاهش مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی و با افزایش نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی، سود اعضای زنجیره‌تامین افزایش می‌یابند.

۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق تصمیمات قیمت‌گذاری و سفارش‌دهی ضایعات بازیافتی برای تولید یک محصول خاص در زنجیره‌تامینی شامل تولیدکننده، بازیافت‌کننده و انبار ضایعات موردبررسی قرار گرفت. تحت زنجیره‌تامین در نظر گرفته‌شده، تولیدکننده می‌توانست مواد ضایعاتی موردنیاز

خود را به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت کند (کانال ۱) یا این‌که این مواد را به‌صورت بازیافت‌شده از بازیافت‌کننده تهیه نماید (کانال ۲). سپس برای تعیین قیمت‌های مربوط به محصول نهایی و مواد ضایعاتی موردنیاز در کانال‌های ۱ و ۲، از رویکرد نظریه بازی استفاده شد. در ادامه برای تشریح مساله موردبررسی، یک مثال عددی در صنعت نساجی ارایه گردید. در نهایت تصمیمات اتخاذشده مورد ارزیابی قرار گرفته و برخی نتایج به‌دست آمدند. نتایج نشان می‌دهند که بهتر است تولیدکننده مواد ضایعاتی موردنیاز خود را به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت کند، اگر هزینه بازیافت مواد ضایعاتی برای وی از یک مقدار مشخص کم‌تر باشد. هنگامی‌که هزینه بازیافت مواد ضایعاتی برای تولیدکننده کم‌تر از هزینه بازیافت برای بازیافت‌کننده است، تقاضای محصول نهایی در کانال ۱ بیش‌تر از کانال ۲ خواهد بود. با افزایش ضریب کش‌سانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن، قیمت‌ها، تقاضاها و سودهای تعیین‌شده در زنجیره‌تامین موردبررسی کاهش می‌یابند. هم‌چنین کاهش مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی و افزایش نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی منجر به افزایش سود اعضای زنجیره‌تامین خواهند شد. در این تحقیق از رویکرد نظریه بازی قطعی برای تحلیل مساله استفاده شد. در تحقیقات آتی می‌توان رویکرد مدل‌سازی فازی یا احتمالی را برای بررسی عدم قطعیت موجود در مساله به‌کار گرفت. هم‌چنین می‌توان از اعمال قراردادهای مختلف برای هماهنگ‌سازی تصمیمات تحت زنجیره‌تامین موردبررسی استفاده نمود.

منابع مالی

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که در فرآیند تحقیق، هیچ‌گونه بودجه یا کمک هزینه تحقیق در یافت 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، پیش‌تر چاپ‌نشده و در حال حاضر تحت انتشار نمی‌باشد.

منابع

[1] Poudel, B., Maley, J., Parton, K., & Morrison, M. (2021). Factors influencing the sustainability of micro-hydro schemes in Nepal. *Renewable and sustainable energy reviews*, *151*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121008224

[2] Lim, J. Y., Safder, U., How, B. S., Ifaei, P., & Yoo, C. K. (2021). Nationwide sustainable renewable energy and power-to-X deployment planning in South korea assisted with forecasting model. *Applied energy*, *283*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920316883

[3] Razmjoo, A., Gakenia Kaigutha, L., Vaziri Rad, M. A., Marzband, M., Davarpanah, A., & Denai, M. (2021). A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area. *Renewable energy*, *164*, 46–57. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120314622

[4] Díaz González, C. A., & Pacheco Sandoval, L. (2020). Sustainability aspects of biomass gasification systems for small power generation. *Renewable and sustainable energy reviews*, *134*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120304706

[5] Wang, W., Feng, L., Zheng, T., & Liu, Y. (2021). The sustainability of ecotourism stakeholders in ecologically fragile areas: implications for cleaner production. *Journal of cleaner production*, *279*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620336519

[6] Zgheib, N., & Takache, H. (2021). Recycling of used lubricating oil by solvent extraction: experimental results, Aspen Plus simulation and feasibility study. *Clean technologies and environmental policy*, *23*(1), 65–76. https://doi.org/10.1007/s10098-020-01893-0

[7] Menges, R., Cloos, J., Greiff, M., Wehrle, J., Goldmann, D., & Rabe, L. (2021). Recycling behavior of private households: an empirical investigation of individual preferences in a club good experiment. *Clean technologies and environmental policy*, *23*(3), 843–856. https://doi.org/10.1007/s10098-020-01929-5

[8] Jang, Y. C., Lee, G., Kwon, Y., Lim, J., & Jeong, J. (2020). Recycling and management practices of plastic packaging waste towards a circular economy in South Korea. *Resources, conservation and recycling*, *158*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920301191

[9] Vazifeh, Z., Mafakheri, F., & An, C. (2021). Biomass supply chain coordination for remote communities: a game-theoretic modeling and analysis approach. *Sustainable cities and society*, *69*, 102819. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721001104

[10] Jeihoonian, M., Kazemi Zanjani, M., & Gendreau, M. (2022). Dynamic reverse supply chain network design under uncertainty: mathematical modeling and solution algorithm. *International ransactions in operational research*, *29*(5), 3161–3189. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/itor.12865

[11] Hammond, D., & Beullens, P. (2007). Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation. *European journal of operational research*, *183*(2), 895–908.

[12] 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. https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJSOM.2020.107206

[13] 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*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054422201297X

[14] 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*(3), 829–842. https://doi.org/10.1007/s10098-021-02216-7

[15] 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). http://ijiepr.iust.ac.ir/article-1-688-en.html

[16] Nagurney, A., Yu, M., Floden, J., & Nagurney, L. S. (2014). Supply chain network competition in time-sensitive markets. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, *70*, 112–127. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554514001227

[17] Nagurney, A., & Li, D. (2014). Equilibria and dynamics of supply chain network competition with information asymmetry in quality and minimum quality standards. *Computational management science*, *11*(3), 285–315. https://doi.org/10.1007/s10287-014-0216-8

[18] 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. DOI:https://doi.org/10.1016/j.tre.2003.12.001

[19] Sun, J., & Debo, L. (2014). Sustaining long-term supply chain partnerships using price-only contracts. *European journal of operational research*, *233*(3), 557–565.

[20] Nagurney, A., & Yu, M. (2012). Sustainable fashion supply chain management under oligopolistic competition and brand differentiation. *International journal of production economics*, *135*(2), 532–540. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311000739

[21] Wang, J., Li, W., Mishima, N., & Adachi, T. (2020). Formalisation of informal collectors under a dual-recycling channel: a game theoretic approach. *Waste management & research*, *38*(5), 576–587.

[22] 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. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344910001564

[23] 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.

[24] Bing, X., Bloemhof-Ruwaard, J., Chaabane, A., & van der Vorst, J. (2015). Global reverse supply chain redesign for household plastic waste under the emission trading scheme. *Journal of cleaner production*, *103*, 28–39. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615001328

[25] Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J., & Van Wassenhove, L. N. (2003). Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International journal of production research*, *41*(16), 3689–3719. https://doi.org/10.1080/0020754031000120087

[26] Chen, Y. J., & Sheu, J. B. (2009). Environmental-regulation pricing strategies for green supply chain management. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, *45*(5), 667–677.

[27] Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S., & Naebe, M. (2020). Death by waste: fashion and textile circular economy case. *Science of the total environment*, *718*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720308275

[28] 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://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619313095

[29] Islam, S., & Bhat, G. (2019). Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. *Journal of environmental management*, *251*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971931254X