



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>).



رویکرد نظریه بازی برای انتخاب کانال تامین مواد اولیه مورد نیاز برای تولید یک محصول ساخته شده 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 مورد نیاز خود را از دو کانال مختلف تهیه کند. وی می‌تواند ضایعات بازیافتی مورد نیاز خود را به صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت و مورد استفاده قرار دهد یا این‌که این مواد را به صورت 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، به کار گرفته می‌شود.

یافته‌ها: در نهایت استراتژی‌های تعیین‌شده مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج به دست آمده ارائه 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 مورد استفاده برای تولید محصول، سود اعضای زنجیره‌تامین مورد بررسی بهبود خواهند یافت.

اصالت/ارزش افزوده علمی: در این تحقیق به منظور تامین مواد اولیه ضایعاتی مورد نیاز 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 مورد نیاز در تولید محصولات تحت زنجیره‌تامین مورد بررسی، 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 تجدیدنناپذیر، مفاهیم پایداری و توسعه پایدار مورد توجه 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 بازیافت پذیر 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 زنجیره تامین برای بهبود عملکردها و اتخاذ تصمیمات مناسب در زنجیره تامین به مدیران کمک می‌کند [9]. زنجیره تامین می‌تواند به صورت مستقیم، معکوس یا دوطرفه باشد [10]. در زنجیره تامین مستقیم، اعضا برای تولید محصولات و تحویل آن‌ها به مشتریان تلاش می‌نمایند. در زنجیره تامین معکوس، محصولات فروخته شده برای استفاده در تولید از مشتریان جمع‌آوری می‌گردند. هم‌چنین در زنجیره تامین دوطرفه، محصولات تولید شده به صورت مستقیم به مشتریان فروخته شده و سپس محصولات استفاده شده به صورت معکوس از آن‌ها پس گرفته شده و مورد استفاده 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 [12]–[15]. در سال‌های اخیر این رویکرد به طور قابل ملاحظه‌ای برای اتخاذ تصمیمات در زنجیره تامین مورد استفاده 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 بازیافت پذیر 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 توپاساکی [18] از رویکرد نظریه بازی برای اتخاذ تصمیمات در زنجیره تامین 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 ارائه داده‌اند. دونگ و همکاران [22] رقابت میان دو محصول تولید شده از ضایعات بازیافت پذیر را تحت زنجیره‌تامینی شامل یک بازیافت کننده و دو تولیدکننده مورد بررسی قرار داده‌اند. هم‌چنین چن و همکاران [23] زنجیره‌تامین بازیافت کاغذ را در تایوان مورد بررسی 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 بازیافت پذیری آن‌ها تاثیر بسزایی در توسعه پایداری دارد [24]. کریکه و همکاران [25] و چن و شیو [26] تاثیر سرمایه‌گذاری بر روی نرخ بازیافت پذیری 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 به منظور توسعه پایداری، از ضایعات بازیافتی برای تولید یک محصول خاص تحت زنجیره‌تامینی شامل تولیدکننده، بازیافت کننده و انبار ضایعات استفاده می‌گردد. در واقع تولیدکننده برای برآوردن تقاضای مشتریان و تولید محصولات، از یک نوع ضایعات بازیافتی با نرخ بازیافت پذیری مشخص استفاده می‌نماید. انبار ضایعات، مواد ضایعاتی را جمع‌آوری نموده و بازیافت کننده آن‌ها را بازیافت می‌کند. تولیدکننده می‌تواند ضایعات بازیافتی مورد نیاز خود را به صورت بازیافت نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت و مورد استفاده قرار دهد یا این‌که این مواد را به صورت بازیافت شده از بازیافت کننده تهیه کند؛ بنابراین، تولیدکننده با توجه به شرایط موجود، یکی از این دو کانال را انتخاب خواهد نمود. هم‌چنین برای اتخاذ تصمیمات تحت هر کدام از کانال‌های ایجاد شده، رویکرد نظریه بازی به کار گرفته خواهد شد.

جزئیات مربوط به مقالات مرورشده و مقایسه تحقیق فعلی با این مقالات در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

Table 1- Details of the reviewed papers.

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



به طور کلی 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 مورد نیاز برای تولید محصولات را انتخاب نماییم. با توجه به مقالات مرورشده می توان گفت که در تحقیق فعلی ایده استفاده از مفهوم انتخاب کانال برای تامین مواد اولیه ضایعاتی مورد نیاز در تولید محصولات تحت زنجیره تامین مورد بررسی، برای اولین بار در ادبیات موضوع مساله مطرح شده است.

ساختار مقاله به صورت زیر است:

مساله مورد بررسی در بخش ۲ توصیف می گردد. در بخش ۳ از رویکرد نظریه بازی برای اتخاذ تصمیمات استفاده خواهد شد. یک مثال عددی در بخش ۴ فراهم شده است. نتایج به دست آمده در بخش ۵ ارائه می شوند. در بخش ۶ دیدگاه های مدیریتی مربوط به نتایج حاصل فراهم می شوند. در نهایت بخش ۷ مربوط به نتیجه گیری و جمع بندی خواهد بود.

۲- تعریف مساله

در این تحقیق تصمیمات قیمت گذاری و سفارش دهی یک نوع ضایعات بازیافتی به عنوان مواد اولیه مورد نیاز برای تولید یک محصول خاص تحت زنجیره تامینی شامل تولیدکننده، بازیافت کننده و انبار ضایعات مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

در زنجیره تامین مورد بررسی، ابتدا تقاضای محصول در بازار با توجه به قیمت آن تعیین می گردد. سپس تولیدکننده از یک نوع ضایعات بازیافتی با نرخ بازیافت پذیری مشخص برای تولید این محصول و تامین نیاز مشتریان استفاده می نماید. انبار ضایعات، مواد بازیافتی مورد نیاز را جمع آوری نموده و بازیافت کننده آن ها را بازیافت می کند. بر این اساس، تولیدکننده می تواند مواد ضایعاتی مورد نیاز خود را از طریق دو کانال زیر تهیه کند:

کانال ۱: تامین ضایعات مورد نیاز به صورت بازیافت نشده از انبار ضایعات و بازیافت آن ها.

کانال ۲: تامین ضایعات مورد نیاز به صورت بازیافت شده از بازیافت کننده.

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. براین اساس دو مساله تصمیم‌گیری مختلف ایجاد می‌گردند. اگر تولیدکننده مواد ضایعاتی موردنیاز خود را از طریق کانال های ۱ یا ۲ تامین کند، به ترتیب مسایل تصمیم‌گیری ۱ و ۲ ایجاد خواهند شد.



تحت ساختار موردبررسی، انبار ضایعات قیمت مواد ضایعاتی جمع‌آوری شده را به تولیدکننده و بازیافت‌کننده اعلام می‌کند. بازیافت‌کننده 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 بازیافت‌شده، 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.

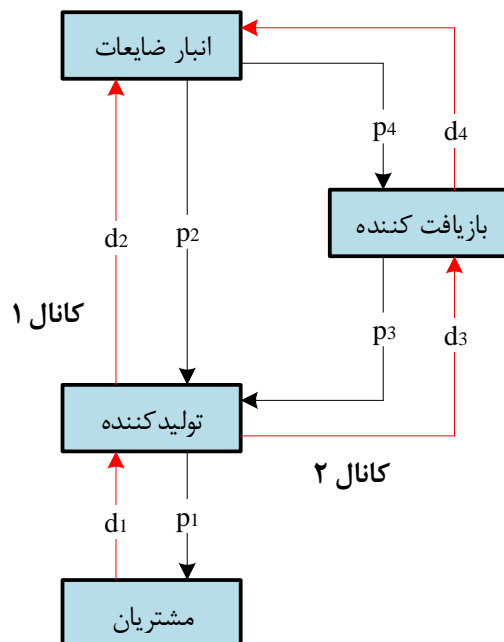
نمادهای مورد استفاده در مساله در جدول ۲ ارایه شده‌اند.

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 (صرف نظر 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 جمع‌آوری شده و سپس در تولید محصول مورد استفاده 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 مورد بررسی.
Figure 1- Structure of the considered problem.

توابع تقاضای مورد بررسی به صورت زیر فرمول بندی می گردند:

$$d_1 = a - bp_1. \quad (1)$$

$$d_2 = \frac{k}{\gamma} d_1 = \frac{k}{\gamma} (a - bp_1). \quad (2)$$

$$d_3 = kd_1 = k(a - bp_1). \quad (3)$$

$$d_4 = \frac{1}{\gamma} d_3 = \frac{k}{\gamma} d_1 = \frac{k}{\gamma} (a - bp_1). \quad (4)$$

در رابطه (۱)، b برابر با تعداد مشتریانی است که به ازای یک واحد افزایش قیمت محصول نهایی از خرید آن منصرف می شوند. در واقع رابطه (۱) تقاضای محصول را نسبت به قیمت آن مشخص می نماید. k/γ مقدار مواد ضایعاتی باز یافت نشده مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی است؛ بنابراین، مقدار کل تقاضای مواد ضایعاتی باز یافت نشده مورد نیاز با استفاده از رابطه (۲) تعیین می گردد. k مقدار مواد ضایعاتی باز یافت شده مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی است. با استفاده از رابطه (۳) مقدار کل تقاضای مواد ضایعاتی باز یافت شده نیز به دست خواهد آمد. رابطه (۴) نیز به همین ترتیب قابل توجیه است.

توابع سود مربوط به اعضای زنجیره تامین در نظر گرفته شده نیز به صورت زیر خواهند بود:

$$u_1 = \begin{cases} p_1 - c_1)d_1 - p_2 + c_2)d_2, & \text{در مساله ۱} \\ p_1 - c_1)d_1 - p_3 d_3. & \text{در مساله ۲} \end{cases} \quad (5)$$

$$u_2 = \begin{cases} 0, & \text{در مساله ۱} \\ p_3 d_3 - p_4 + c_3)d_4. & \text{در مساله ۲} \end{cases} \quad (6)$$

$$u_3 = \begin{cases} p_2 - c_4)d_2, & \text{در مساله ۱} \\ p_4 - c_4)d_4. & \text{در مساله ۲} \end{cases} \quad (7)$$

با جای گذاری توابع تقاضای (۱) تا (۴) در توابع سود (۵) تا (۷)، سود اعضای زنجیره به صورت زیر بازنویسی می شوند:



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

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

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

هم چنین به منظور شدنی بودن جواب های به دست آمده برای مسایل تصمیم گیری ۱ و ۲، به ترتیب محدودیت های (۱۱) و (۱۲) باید در نظر گرفته شوند:

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

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

محدودیت های تعیین شده در رابطه (۱۱) و رابطه (۱۲) تضمین می کنند که سود حاشیه ای اعضای زنجیره تامین و مقادیر تقاضای مربوط به محصول نهایی و مواد ضایعاتی در مسایل مورد بررسی نامنفی هستند.

در بخش بعد برای اتخاذ تصمیمات مورد بررسی از رویکرد نظریه بازی استفاده می گردد.

۳- رویکرد نظریه بازی

در این بخش اعضای زنجیره تامین در نظر گرفته شده (بازیکنان) برای تعیین قیمت های مربوط به محصول نهایی و مواد ضایعاتی در مسایل مورد بررسی، از رویکرد نظریه بازی استفاده می کنند.

لازم به ذکر است با توجه به قدرت بیش تر تولیدکننده در بازار نسبت به انبار ضایعات و بازیافت کننده، ابتدا تولیدکننده و سپس انبار ضایعات و بازیافت کننده تصمیمات خود را اتخاذ می نمایند. در واقع برای تعیین استراتژی های مربوط به هر بازیکن، بازی استکلبرگ به کار گرفته می شود که در آن تولیدکننده به عنوان رهبر بازی و انبار ضایعات و بازیافت کننده به عنوان پیرو تصمیمات اتخاذ شده توسط رهبر، در نظر گرفته شده اند.

هم چنین تولیدکننده هنگامی در این بازی رقابتی شرکت می کند که سود تخصیص داده شده به وی حداقل دو برابر بیش تر از سودهای تخصیص داده شده به انبار ضایعات و بازیافت کننده باشد. در واقع تولیدکننده به عنوان رهبر بازی انتظار دارد به طور قابل ملاحظه ای سود بیش تری نسبت به انبار ضایعات و بازیافت کننده دریافت کند که این نسبت به صورت دو برابر در نظر گرفته شده است.

۱-۳- اتخاذ تصمیمات در مساله تصمیم گیری ۱

در این مساله، تولیدکننده مواد ضایعاتی مورد نیاز خود را از طریق کانال ۱ تهیه می کند. در واقع وی برای برآوردن تقاضای مشتریان، مواد ضایعاتی مورد نیاز را به صورت بازیافت نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن ها را بازیافت می کند.

همان طور که پیش تر نیز اشاره شد، در بازی استکلبرگ مربوط به مساله تصمیم گیری ۱، تولیدکننده به عنوان رهبر و انبار ضایعات به عنوان پیرو، استراتژی های خود را تعیین می کنند. در واقع ابتدا تولیدکننده با قدرت تصمیم گیری بیش تر، قیمت هر واحد محصول نهایی را برای مشتریان مشخص می نماید. سپس انبار ضایعات با قدرت تصمیم گیری کم تر، قیمت ضایعات بازیافت نشده را به تولیدکننده اعلام می کند. بازی استکلبرگ مربوط به مساله ۱ به صورت زیر فرمول بندی می گردد:



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{سطح اول: تعیین تصمیمات مربوط به بازیکن رهبر} \\ \max_{p_1} u_1 = a - bp_1 \left(p_1 - \frac{k}{\gamma} p_2 - c_1 - \frac{k}{\gamma} c_2 \right), \\ \text{سطح دوم: تعیین تصمیمات مربوط به بازیکن پیرو} \\ \max_{p_2} u_3 = \frac{k}{\gamma} (a - bp_1) p_2 - c_4, \\ \text{محدودیت‌های مساله} \\ \gamma p_1 \geq kp_2 + \gamma c_1 + kc_2, p_2 \geq c_4, a - bp_1 \geq 0. \end{array} \right. \quad (13)$$

اکنون سعی می‌کنیم جواب مساله (۱۳) را بیابیم. ابتدا با در اختیار داشتن قیمت مشخص شده 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 به صورت خطی و صعودی است.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_3}{dp_2} = \frac{k}{\gamma} (a - bp_1) \geq 0, \\ \frac{d^2u_3}{d^2p_2} = 0. \end{array} \right. \quad (14)$$

به وضوح با توجه به مشتق‌های مرتبه اول و دوم محاسبه‌شده در رابطه (۱۴) ثابت می‌گردد که u_3 نسبت به p_2 به صورت 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 ارائه‌شده می‌توان گفت که در شرایط عادی نقطه تعادل این بازی در شرایطی تولید می‌گردد که تولیدکننده بدون هیچ سودی در بازی مشارکت کند؛ اما به نظر می‌رسد که تعادل به‌دست‌آمده منطقی نبوده و منجر به عدم تشکیل بازی می‌گردد. به همین 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 مشخص شده توسط تولیدکننده به صورت زیر است:

$$p_2(p_1) = \frac{\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_2 + 2kc_4}{3k} \quad (15)$$

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 $p_2 \leq (\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_2 + 2kc_4) / 3k$ به دست می‌آید. با توجه به لم ۱، قیمت بهینه انبار ضایعات برای ضایعات بازیافت‌نشده برابر با $(\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_2 + 2kc_4) / 3k$ به عنوان حداکثر مقدار شدنی آن است.

با جای‌گذاری $p_2(p_1)$ در تابع u_1 ، تابع سود جدید u_1' به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u'_1 = \frac{2(a - bp_1)(\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_2 - kc_4)}{3\gamma} \quad (16)$$

اکنون تولیدکننده قیمت محصول نهایی را با حداکثر نمودن تابع u'_1 تعیین می کند.

لم ۲- تابع u'_1 نسبت به p_1 به صورت اکید مقعر است.

اثبات داریم:

$$\begin{cases} \frac{du'_1}{dp_1} = \frac{2a\gamma + b\gamma c_1 + bkc_2 + bkc_4 - 2b\gamma p_1}{3\gamma}, \\ \frac{d^2u'_1}{d^2p_1} = -\frac{4}{3}b < 0. \end{cases} \quad (17)$$

چون مشتق مرتبه دوم منفی است، u'_1 نسبت به p_1 به صورت اکید مقعر خواهد بود.

با توجه به لم ۲ می توان 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، آن گاه این جواب می تواند به عنوان استراتژی انتخاب شده توسط تولیدکننده در نظر گرفته شود.

قضیه ۲- قیمت های تعیین شده توسط تولیدکننده و انبار ضایعات به ترتیب برای محصول نهایی و ضایعات بازیافت نشده در مساله تصمیم گیری ۱ به صورت زیر هستند:

$$\begin{cases} p_1^1 = \frac{a\gamma + b\gamma c_1 + bkc_2 + bkc_4}{2b\gamma}, \\ p_2^1 = \frac{a\gamma - b\gamma c_1 - kbc_2 + 5kbc_4}{6bk}. \end{cases} \quad (18)$$

اثبات: با حل مشتق مرتبه اول محاسبه شده در رابطه (۱۷) نسبت به p_1 و جای گذاری آن در رابطه (۱۵)، جواب رابطه (۱۸) به دست می آید. این جواب در محدودیت های ارایه شده در رابطه (۱۱) نیز صدق می کند. در واقع با جای گذاری قیمت های به دست آمده در رابطه (۱۸) در محدودیت های مربوط به رابطه (۱۱) ثابت می شود 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 می کنیم که این رابطه برقرار است.

برگرفته از محدودیت های $kp_2 + \gamma c_1 + kc_2 \geq \gamma p_1 \geq c_4$ 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. هنگامی که تولیدکننده حداقل مقدار ممکن را برای قیمت محصول نهایی در نظر می گیرد، انتظار می رود که تقاضای محصول نهایی نامنفی باشد و این یک فرض بدیهی است. با جای گذاری رابطه $p_1 = (kc_4 + \gamma c_1 + kc_2)/\gamma$ در تابع تقاضای $d_1 = a - bp_1$ به راحتی ثابت می گردد 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 می نماید.

اکنون می توان با جای گذاری قیمت های به دست آمده در رابطه (۱) تا رابطه (۴)، مقادیر تقاضا در مساله ۱ را تعیین نمود.

قضیه ۳- تقاضای محصول نهایی سفارش داده شده توسط مشتریان به تولیدکننده و تقاضای مواد ضایعاتی بازیافت نشده تعیین شده توسط تولیدکننده به انبار ضایعات در مساله تصمیم گیری ۱ به صورت زیر به دست می آیند:

$$\begin{cases} d_1^1 = \frac{a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_2 - bkc_4}{2\gamma}, \\ d_2^1 = \frac{k(a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_2 - bkc_4)}{2\gamma^2}. \end{cases} \quad (19)$$

اثبات: مقادیر تقاضای محصول نهایی و مواد ضایعاتی بازیافت نشده، با جای گذاری قیمت های تعیین شده در رابطه (۱۸) در رابطه (۱) و رابطه (۲) محاسبه می شوند.



هم چنین با جای گذاری قیمت ها و تقاضاهای به دست آمده در رابطه (۵) تا رابطه (۷)، مقادیر سود اعضا در مساله ۱ نیز تعیین می شوند.

قضیه ۴ - مقادیر سود مربوط به تولیدکننده و انبار ضایعات در مساله تصمیم گیری ۱ به صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} u_1^1 = \frac{a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_2 - bkc_4}{6b\gamma^2}, \\ u_3^1 = \frac{a\gamma - b\gamma c_1 - bkc_2 - bkc_4}{12b\gamma^2}. \end{cases} \quad (20)$$

اثبات: مقادیر سود تولیدکننده و انبار ضایعات، با جای گذاری رابطه (۱۸) در رابطه (۵) و رابطه (۷) تعیین می شوند.



۳-۲- اتخاذ تصمیمات در مساله تصمیم گیری ۲

در مساله تصمیم گیری ۲، تولیدکننده مواد ضایعاتی مورد نیاز خود را از طریق کانال ۲ تهیه می کند. به عبارت دیگر تولیدکننده برای برآوردن تقاضای مشتریان، مواد ضایعاتی مورد نیاز خود را به صورت بازیافت شده از بازیافت کننده خریداری می کند. هم چنین بازیافت کننده برای تامین مواد ضایعاتی مورد نیاز خود، آن ها را به صورت بازیافت نشده از انبار ضایعات خریداری و سپس بازیافت می نماید.

در بازی استکلبرگ مربوط به مساله ۲، تولیدکننده به عنوان رهبر و بازیافت کننده و انبار ضایعات به عنوان پیرو، تصمیمات خود را اتخاذ می کنند. در واقع ابتدا تولیدکننده با قدرت تصمیم گیری بیش تر، قیمت هر واحد محصول نهایی را برای مشتریان مشخص می کند. سپس بازیافت کننده و انبار ضایعات با قدرت تصمیم گیری کم تر، قیمت های خود را اعلام می نمایند. به عبارت دیگر بازیافت کننده، قیمت ضایعات بازیافت شده را برای تولیدکننده و انبار ضایعات، قیمت ضایعات بازیافت نشده را برای بازیافت کننده تعیین می کند. بازی استکلبرگ مربوط به مساله تصمیم گیری ۲ به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$\begin{cases} \text{سطح اول: تعیین تصمیمات مربوط به بازیکن رهبر} \\ \max_{p_1} u_1 = a - bp_1 - kp_3 - c_1, \\ \text{سطح دوم: تعیین تصمیمات مربوط به بازیکنان پیرو} \\ \max_{p_3} u_2 = a - bp_1 \left(kp_3 - \frac{k}{\gamma} p_4 - \frac{k}{\gamma} c_3 \right), \\ \max_{p_4} u_3 = \frac{k}{\gamma} (a - bp_1) p_4 - c_4, \\ \text{محدودیت های مساله} \\ p_1 \geq kp_3 + c_1, \gamma p_3 \geq p_4 + c_3, p_4 \geq c_4, a - bp_1 \geq 0. \end{cases} \quad (21)$$

ابتدا با دانستن قیمت محصول نهایی مشخص شده توسط تولیدکننده، بازیافت کننده و انبار ضایعات به ترتیب قیمت ضایعات بازیافت شده و قیمت ضایعات بازیافت نشده را تعیین می کنند.

لم ۳- توابع u_2 و u_3 به ترتیب نسبت به قیمت های p_4 و p_3 به صورت خطی و صعودی هستند.

اثبات داریم:

$$\begin{cases} \frac{du_2}{dp_3} = k a - bp_1 \geq 0, \\ \frac{d^2 u_2}{d^2 p_3} = 0. \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \frac{du_3}{dp_4} = \frac{k}{\gamma} (a - bp_1) \geq 0, \\ \frac{d^2 u_3}{d^2 p_4} = 0. \end{cases} \quad (23)$$

با توجه به مشتق های مرتبه اول و دوم محاسبه شده در رابطه (۲۲) و رابطه (۲۳)، به وضوح u_3 و u_2 به ترتیب نسبت به p_4 و p_3 به صورت خطی و صعودی هستند.



بنابراین می توان گفت که از دیدگاه بازیافت کننده 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 داده شده به تولیدکننده حداقل دو برابر بیش تر از سودهای تخصیص داده شده به انبار ضایعات و بازیافت کننده است، برای تولید تعادل در مساله ۲ استفاده می گردد.

قضیه ۵- قیمت تعیین شده توسط بازیافت کننده برای ضایعات بازیافت شده و قیمت تعیین شده توسط انبار ضایعات برای ضایعات بازیافت نشده بر حسب قیمت محصول نهایی به صورت زیر هستند:

$$\begin{cases} p_3(p_1) = \frac{\gamma p_1 - \gamma c_1 + kc_3 + kc_4}{2k\gamma} \\ p_4(p_1) = \frac{\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_3 + 3kc_4}{4k} \end{cases} \quad (24)$$

اثبات: سود تخصیص داده شده به تولیدکننده در بازی استکلبرگ حداقل دو برابر بیش تر از سودهای تخصیص داده شده به بازیافت کننده و انبار ضایعات است. در نتیجه روابط $u_1 \geq 2u_3$ و $u_1 \geq 2u_2$ در مساله تصمیم گیری ۲ برقرار هستند. با جای گذاری توابع سود بازیکنان در این روابط و ساده سازی آن ها، 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 تعیین شده توسط بازیافت کننده برای ضایعات بازیافت شده و قیمت تعیین شده توسط انبار ضایعات برای ضایعات بازیافت نشده به ترتیب برابر با $(\gamma p_1 - \gamma c_1 + 2kc_3 + 2kp_4)/3k\gamma$ و $(\gamma p_1 - \gamma c_1 + 2kc_4 - k\gamma p_3)/2k$ به عنوان حداکثر مقادیر شدنی آن ها خواهند بود. با حل هم زمان 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) به دست می آید.

تابع سود جدید u_1'' با جای گذاری $p_3(p_1)$ و $p_4(p_1)$ در تابع u_1 به صورت زیر حاصل می گردد:

$$u_1'' = \frac{a - bp_1}{2\gamma} (\gamma p_1 - \gamma c_1 - kc_3 - kc_4) \quad (25)$$

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

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

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

$$\begin{cases} \frac{du_1''}{dp_1} = \frac{a\gamma + b\gamma c_1 + bkc_3 + bkc_4 - 2b\gamma p_1}{2\gamma} \\ \frac{d^2u_1''}{d^2p_1} = -b < 0. \end{cases} \quad (26)$$

به وضوح u_1'' نسبت به p_1 به صورت اکید مقعر است.

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

قضیه ۶- قیمت تعیین شده توسط تولیدکننده برای محصول نهایی، قیمت تعیین شده توسط بازیافت کننده برای ضایعات بازیافت شده و قیمت تعیین شده توسط انبار ضایعات برای ضایعات بازیافت نشده در مساله تصمیم گیری ۲ به صورت زیر به دست می آیند:

$$\begin{cases} p_1^2 = \frac{a\gamma + b\gamma c_1 + bkc_3 + bkc_4}{2b\gamma} \\ p_3^2 = \frac{a\gamma - b\gamma c_1 + 3bkc_3 + 3bkc_4}{4bk\gamma} \\ p_4^2 = \frac{a\gamma - b\gamma c_1 + bkc_3 - 7bkc_4}{8bk} \end{cases} \quad (27)$$

اثبات: با حل مشتق مرتبه اول ارایه شده در رابطه (۲۶) نسبت به p_1 و جای گذاری آن در رابطه (۲۴)، جواب رابطه (۲۷) حاصل می شود. این جواب در محدودیت های مربوط به رابطه (۱۲) نیز صادق است. با جای گذاری قیمت های تعیین شده 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:

$$\begin{cases} d_1^2 = \frac{a\gamma - b\gamma c_1 - kbc_3 - kbc_4}{2\gamma}, \\ d_3^2 = \frac{k(a\gamma - b\gamma c_1 - kbc_3 - kbc_4)}{2\gamma}, \\ d_4^2 = \frac{k(a\gamma - b\gamma c_1 - kbc_3 - kbc_4)}{2\gamma^2}. \end{cases} \quad (28)$$

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:

$$\begin{cases} u_1^2 = \frac{(a\gamma - b\gamma c_1 - kbc_3 - kbc_4)^2}{8b\gamma^2}, \\ u_2^2 = \frac{(a\gamma - b\gamma c_1 - kbc_3 - kbc_4)^2}{16b\gamma^2}, \\ u_3^2 = \frac{(a\gamma - b\gamma c_1 - kbc_3 - kbc_4)^2}{16b\gamma^2}. \end{cases} \quad (29)$$

اثبات: با جای‌گذاری رابطه (۲۷) در رابطه‌های (۵) تا (۷)، مقادیر سود اعضای زنجیره‌تأمین 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 الیاف مصنوعی 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 بازیافت‌شده را بازیافت نماید.

هزینه تولید هر تن الیاف مصنوعی برای تولیدکننده برابر با $c_1 = 1000000$ تومان، هزینه بازیافت هر تن مواد پلاستیکی بازیافت‌نشده برای تولیدکننده برابر با $c_2 = 500000$ تومان، هزینه بازیافت هر تن مواد پلاستیکی بازیافت‌نشده برای کارخانه بازیافت برابر با $c_3 = 350000$ تومان و هزینه جمع‌آوری هر تن مواد پلاستیکی برای انبار ضایعات برابر با $c_4 = 200000$ تومان تخمین زده شده‌اند. برای تولید هر تن الیاف مصنوعی $k = 3$ تن ضایعات پلاستیکی بازیافت‌شده موردنیاز بوده و نرخ بازیافت‌پذیری ضایعات پلاستیکی مورد استفاده برابر با

$\gamma = 0.7$ است. حداکثر تقاضای مشتریان در بازار برای الیاف مصنوعی تولید شده برابر با $a = 2000000$ تن بوده و ضریب کشسانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن برابر با $b = 0.03$ برآورد شده است.

نتایج مربوط به جواب‌های به‌دست‌آمده برای مسایل تصمیم‌گیری ۱ و ۲ تحت مثال عددی مورد بررسی 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 مورد نیاز به‌صورت بازیافت‌شده از کارخانه بازیافت خریداری شود.

جدول ۳- نتایج مربوط به مثال عددی مورد بررسی.

Table 3- Results for the investigated numerical example.

عنوان	جواب مساله ۱	جواب مساله ۲
قیمت هر تن الیاف مصنوعی (تومان)	53333333	50119000
قیمت هر تن 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)	35555555555	410735544222
سود کارخانه بازیافت (تومان)	-	205367772111
سود انبار ضایعات (تومان)	17777777777	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 مورد نیاز به‌صورت بازیافت‌نشده از انبار ضایعات و بازیافت آن‌ها) یا کانال ۲ (تامین مواد ضایعاتی مورد نیاز 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:

$$u_1^1 \geq u_1^2 \quad \text{اگر و تنها اگر} \quad c_2 \leq v. \quad (30)$$

که در آن داریم:

$$v = \frac{(2\sqrt{3} - 3) \gamma a - b\gamma c_1 - bkc_4 + 3bkc_3}{2\sqrt{3}bk}. \quad (31)$$

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:

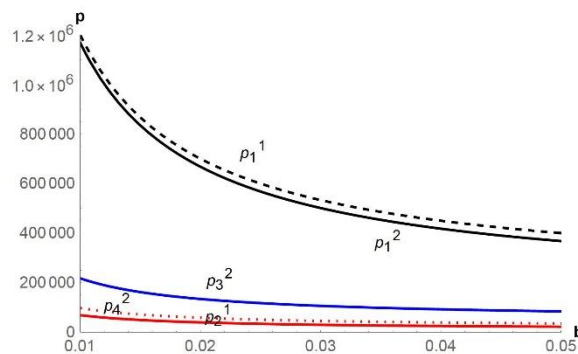
$$p_1^1 \geq p_1^2 \quad \text{اگر و تنها اگر} \quad c_2 \geq c_3. \quad (32)$$

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 ارائه‌شده در بخش ۴ استفاده می‌گردد.

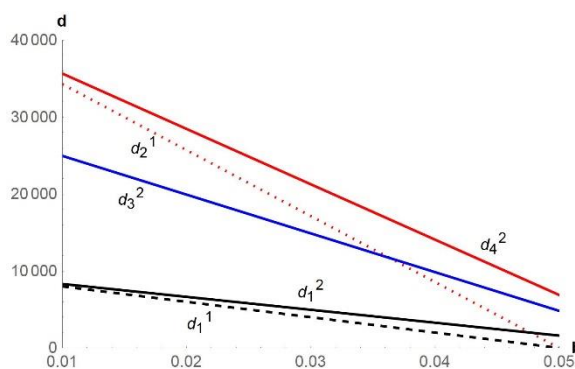


تأثیر تغییرات ضریب کشسانی تقاضای محصول نهایی نسبت به قیمت آن (b) بر روی قیمت‌ها، تقاضاها و سودهای حاصل از مسایل موردبررسی به ترتیب در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.



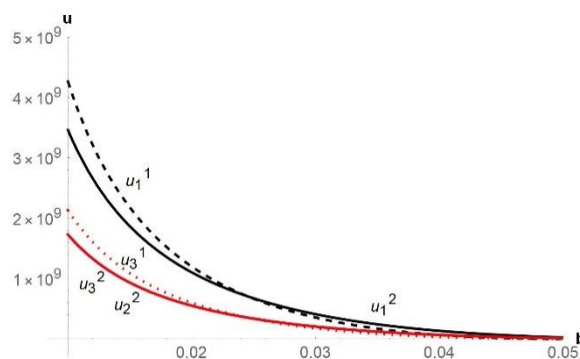
شکل ۲- تغییرات قیمت‌ها نسبت به b .

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



شکل ۳- تغییرات تقاضاها نسبت به b .

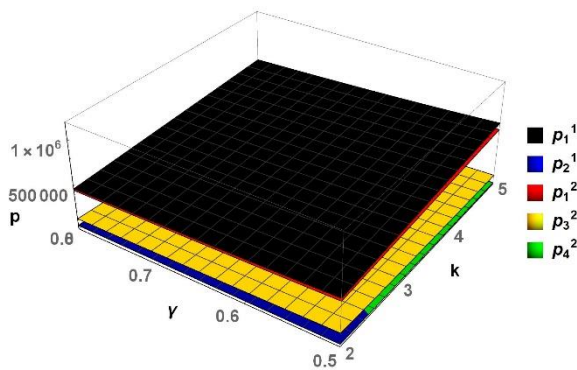
Figure 3- Changes of the demands in regard to b .



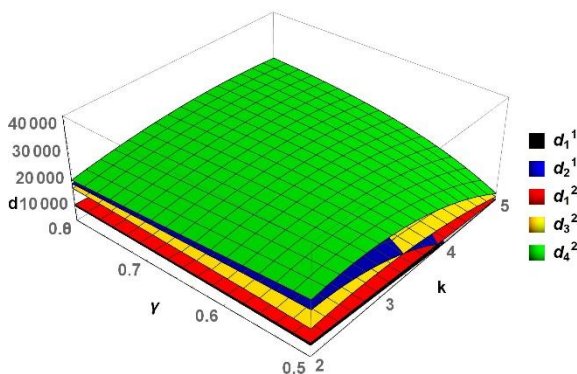
شکل ۴- تغییرات سودها نسبت به b .

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

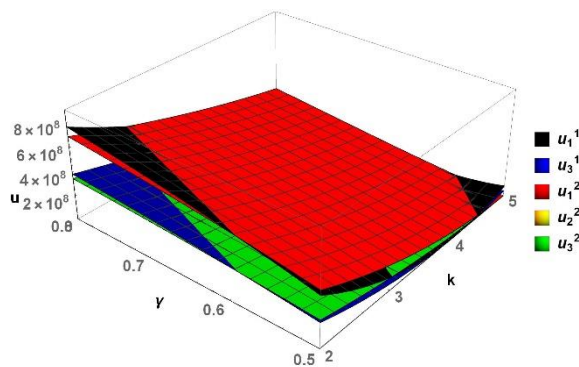
هم‌چنین نحوه تغییرات قیمت‌ها، تقاضاها و سودها نسبت به تغییرات هم‌زمان مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی (k) و نرخ بازیافت‌پذیری مواد ضایعاتی (γ) به ترتیب در شکل ۵ تا شکل ۷ نشان داده شده‌اند.



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 ارزیابی شده در بخش ۵ فراهم خواهند شد. براین اساس داریم:

دیدگاه مدیریتی ۱ (برگرفته از نتیجه ۱): از دیدگاه تولیدکننده مقرون به صرفه است که وی مواد ضایعاتی مورد نیاز خود را به صورت بازیافت نشده 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 بیش تر نباشد.



دیدگاه مدیریتی ۲ (برگرفته از نتیجه ۲): هنگامی که هزینه بازیافت مواد ضایعاتی برای تولیدکننده کم‌تر از هزینه بازیافت برای بازیافت‌کننده 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 هنگامی که 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 هنگامی که 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، هنگامی که مقدار ضایعات بازیافت‌شده موردنیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی و نرخ بازیافت‌پذیری 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، در صورتی که 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 به صورت بازیافت نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت کند (کانال ۱) یا این که این مواد را به صورت بازیافت شده از بازیافت کننده تهیه نماید (کانال ۲). سپس برای تعیین قیمت‌های مربوط به محصول نهایی و مواد ضایعاتی مورد نیاز در کانال‌های ۱ و ۲، از رویکرد نظریه بازی استفاده شد. در ادامه برای تشریح مساله مورد بررسی، یک مثال عددی در صنعت نساجی ارائه گردید. در نهایت تصمیمات اتخاذ شده مورد ارزیابی قرار گرفته و برخی نتایج به دست آمدند. نتایج نشان می‌دهند که بهتر است تولیدکننده مواد ضایعاتی مورد نیاز خود را به صورت بازیافت نشده از انبار ضایعات خریداری نموده و سپس آن‌ها را بازیافت کند، اگر هزینه بازیافت مواد ضایعاتی برای وی از یک مقدار مشخص کم‌تر باشد. هنگامی که هزینه بازیافت مواد ضایعاتی برای تولیدکننده کم‌تر از هزینه بازیافت برای بازیافت کننده 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 تعیین شده در زنجیره تامین مورد بررسی کاهش می‌یابند. هم‌چنین کاهش مقدار ضایعات بازیافت شده مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی و افزایش نرخ بازیافت پذیری مواد ضایعاتی منجر به افزایش سود اعضای زنجیره تامین 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 به کار گرفت. هم‌چنین می‌توان از اعمال قراردادهای مختلف برای هماهنگ‌سازی تصمیمات تحت زنجیره‌تأمین مورد بررسی استفاده نمود.

منابع مالی

بدین وسیله نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که در فرآیند تحقیق، هیچ‌گونه بودجه یا کمک هزینه تحقیق دریافت ننموده‌اند.

تعارض با منافع

بدین وسیله نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضادی در منافع در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد، همه نویسندگان نسخه نهایی ارسال شده را مشاهده و تایید کرده‌اند. نویسندگان تضمین می‌کنند که مقاله اثر اصلی آن‌ها بوده، پیش‌تر چاپ نشده 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/S095965262036519>
- [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 transactions 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>

