TEEGES

Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article (2026) 4(4):76-99

Pricing and Carbon Emission Reduction Effort Decision in an Electric and Gasoline Vehicle Supply Chain Considering Government: a Game Theory Approach

Mohammad Mahdi Sheikhi-Nasrabadi[1], *M.Sc*, Hossein Khosroshahi[1], *Assistant Professor*

[1] *Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran*

Abstract:

While the market for new electric vehicles is growing significantly, some environmental issues, such as carbon emissions, are often attributed to the production of electric cars. In this research, a supply chain including a manufacturer that sells electric and gasoline vehicles through a retailer was investigated. A game theory approach has been used for modeling and problem solving. The assumption was made that the government, as a leader or pioneer, implements various policies based on the concept of sustainability. Consequently, the manufacturer and retailer seek to maximize their profits in the Stackelberg competition based on these policies. As a result of this research, managerial insights for real-world application were obtained. For instance, thresholds for coefficients and parameters, such as the conversion rate of environmental value to financial value, were identified. These show that if green investment in production lines depends on product demand, the market (or consumer) price and the factory price of electric cars will be higher compared to a scenario where the importance of green investment for the government is independent of demand. However, in the first scenario explained, the government provides more support for electric cars. To provide practical managerial insights in the real world, this research focused on parametric analyses.

Keywords: Pricing; Electric vehicle; Carbon emission reduction; Sustainable supply chain; Game theory, Stackelberge competition

Received: 04 June 2024
Revised: 31 August 2024
Accepted: 15 November 2024
Corresponding Author: Dr. Hossein Khosroshahi, khosroshahi@iut.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1040737

CC BY

قیمت گذاری و تصمیم گیری در خصوص تلاش برای کاهش انتشار کربن در یک زنجیره تأمین تولید خودروهای بنزینی و خودروهای الکتریکی با درنظرگیری دولت

فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

TEEGES

مقاله پژوهشی

قیمت گذاری و تصمیم‌گیری در خصوص تلاش برای کاهش انتشار کربن در یک زنجیره تأمین تولید خودروهای بنزینی و خودروهای الکتریکی با درنظرگیری دولت: یک رویکرد نظریه بازی

محمد مهدی شیخی نصرآبادی[1]، *کارشناسی ارشد*، حسین خسروشاهی[1]، *استادیار*

۱- دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده: در حالی که بازار خودروهای الکتریکی جدید به طور چشمگیری در حال رشد است، برخی از مشکلات زیست محیطی، مانند انتشار کربن، معمولاً به تولید خودروهای الکتریکی نسبت داده می‌شود. در این پژوهش، یک زنجیره تامین شامل یک تولیدکننده که خودروی الکتریکی و بنزینی را از طریق یک خرده فروش به فروش می‌رساند، مورد پژوهش قرار داده شد. در این پژوهش، از یک رویکرد نظریه بازی برای مدل سازی و حل مسئله استفاده شده است. در این پژوهش فرض شده است که دولت به عنوان رهبر در بازی استکلبرگ سیاست‌های متفاوتی را که بر مبنای مفهوم توسعه‌ی پایدار طراحی شده اند، به اجرا در می‌آورد. تحت این سیاست‌ها، تولیدکننده و خرده فروش تلاش در بیشینه سازی سود اقتصادی خود در رقابت استکلبرگ دارند. در نتیجه‌ی این پژوهش، دیدگاه‌های مدیریتی به منظور استفاده در مسائل واقع‌گرایانه واقعی بدست آمده است. به عنوان مثال، آستانه‌هایی برای ضرایب و پارامترهایی نظیر ضریب تبدیل ارزش زیست محیطی به ارزش مالی به دست آمده که نشان می‌دهد اگر سرمایه گذاری سبز در خط تولید به تقاضای محصول بستگی داشته باشد، قیمت بازار (همان قیمت مصرف‌کننده) و قیمت کارخانه‌ی محصول خودروهای الکتریکی در مقایسه با وضعیتی که اهمیت سرمایه گذاری سبز برای دولت مستقل از تقاضا است، گران تر خواهد بود. با این حال دولت در فرض نخست، بیشتر از خودروهای الکتریکی حمایت می‌کند. به منظور ارائه بینش‌های مدیریتی کاربردی در دنیای واقعی، در این پژوهش بر روی تحلیل‌های پارامتریک تمرکز قرار گرفت.

واژه های کلیدی: قیمت گذاری؛ خودروهای الکتریکی؛ کاهش آلاینده‌های کربنی؛ مدیریت زنجیری تامین پایدار: نظریه‌ی بازی: رقابت استکلبرگ

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسین خسروشاهی، khosroshahi@iut.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1040737

CC BY

۱- مقدمه

از پیامدهای انقلاب صنعتی، مورد توجه قرار گرفتن پایداری مالی، اجتماعی و زیست محیطی بوده است. در بین ابعاد پایداری، بعد زیست محیطی بسیار مهم است زیرا ابعاد دیگر پایداری به آن بستگی دارند. بهره‌برداری از منابع طبیعی انرژی، به‌ویژه سوخت‌های فسیلی، بدون در نظر گرفتن اثرات بلندمدت آن‌ها، بدتر شدن بحران‌های زیست‌محیطی و گرمایش جهانی پیامدهای جدی را در پی دارد و بشر را در معرض خطر قرار می‌دهد [۱]. فناوری‌های اخیر درخط تولید سبز می‌تواند به سرعت انتشارات آلایندگی‌ها را کاهش دهد. مصرف انرژی در بخش حمل و نقل، ۲۹ درصد از انرژی مصرفی در جهان و ۳۰ درصد انرژی مصرفی در کشورهای توسعه‌یافته را تشکیل می‌دهد. این بخش همچنین مصرف ۶۵ درصد نفت جهان و انتشار ۲۴ درصد دی اکسید کربن را سبب می‌شود. پیشرفت‌های اخیر در بخش حمل و نقل می‌توانند این مشکلات را بهبود بخشند مانند استفاده از خودروهای برقی[۲]. علت اصلی این امر عموما این است که این خودروها در مصرف انرژی کارآمد تر هستند، ردپای کربن کمتری دارند، با طبیعت سازگار هستند، صدای کمتری نسبت به خودروهای احتراق داخلی ایجاد می‌کنند و به دلیل موتور الکتریکی پیشرفته و کم استهلاک، به تعمیر و نگهداری کمتری نیاز دارند[۳, ۴].

بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹، تعداد خودروهای الکتریکی در جاده‌ها از ۱۷۰۰۰ به ۷.۲ میلیون افزایش یافت و نشان داده شد که این خودروها می‌توانند جایگزین خودروهای بنزینی شوند. خودروهای الکتریکی ۷۵ درصد از خودروهای جدید فروخته شده در نروژ را در سال ۲۰۲۰ تشکیل می‌دهند، اما تعداد کمی از کشورهای دیگر از این روند پیروی کردند. تنها در ۲۰ کشور سهم بازار خودروهای الکتریکی بیش از ۱٪ می‌باشد[۵]. کشورهایی مانند هند، ژاپن و چین برنامه‌هایی مانند EV30@30[۱] را برای به دست آوردن ۳۰ درصد از بازار خودروهای الکتریکی تا سال ۲۰۳۰ به کار گرفته‌اند. چشم انداز انرژی جهانی اخیر از سوی آژانس بین المللی انرژی پیش بینی می‌کند تا سال ۲۰۴۰ فروش خودروهای الکتریکی به ۸۷۵ میلیون برسد. در چین، سال‌های بین ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷، ۳۳۱۰۰۰، ۵۰۷۰۰۰ و ۷۷۷۰۰۰ دستگاه خودروی الکتریکی وارد بازار شد[۶]. چندین کشور متعهد شده اند که از تاریخ مشخصی، تنها مجوز تولید و فروش خودروهای‌الکتریکی را قانونی کنند. ایرلند، هلند، ایسلند و سوئد قصد دارند تا سال ۲۰۳۰ فروش خودروی بنزینی را متوقف کنند، در حالی که نروژ به آرامی به دنبال اجرای این سیاست تا سال ۲۰۲۵ است. اسکاتلند، بریتانیا، دانمارک، اسپانیا، فرانسه و کاستاریکا می‌خواهند این سیاست را به ترتیب تا سال‌های ۲۰۳۲، ۲۰۳۵، ۲۰۴۰ و۲۰۵۰ اجرا کنند [۵]. ارائه محصولات دوستدار محیط زیست اگرچه مهم است، اما این امر بدون کمک‌های دولتی به راحتی امکان پذیر نیست. بنابراین، دولت باید در کاهش محصولات سبز و استراتژی ریسک سرمایه گذاری پیشرو باشد. در پژوهش‌های زنجیره‌تامین، دولت اغلب به عنوان رهبر در رقابت استکلبرگ در نظر گرفته می‌شود زیرا قوانین آن می‌تواند بر سود اعضای زنجیره تامین تأثیر بگذارد. اهداف دولت در این سیاست‌ها معمولاً شامل افزایش تعداد خودروهای الکتریکی، کاهش آلایندگی‌های زیست‌محیطی، افزایش درآمد دولت، و بهبود مازاد مصرف کننده به عنوان یک شاخص رفاه اجتماعی است. این اهداف دولت از طریق روش‌های متعدد محقق می‌شود. استراتژی‌های بهینه‌سازی پرداخت یارانه و اخذ مالیات به طور گسترده در پژوهش‌های پیشین در سیستم مالی مورد استفاده قرار گرفته‌است[۶, ۷].

دولت می‌تواند برای تشویق مردم به خرید خودروی الکتریکی، این محصول را شامل یارانه کند[۸, ۹]. دولت‌ها در موارد گوناگون، چندین بار این سیاست را به عنوان عاملی برای افزایش انگیزه، اجراکرده است. در سال ۲۰۰۹، دولت در ۱۳ کشور اروپایی از طریق طرح اسقاط خودرو، ۵۰۰ تا ۶۰۰۰ یورو به مشتریان خودروهای جدید و زیست‌محیطی پرداخت کردند. بر اساس یک برنامه سراسری «قدیمی در برابر جدید»[۲]، شورای دولتی چین به مصرف‌کنندگانی که خودروهای قدیمی خود را با دستگاه‌های جدیدی که استانداردهای بهره‌وری انرژی را برآورده می‌کنند جایگزین کردند، یارانه پرداخت کرد[۱۰]. از سال ۲۰۰۹، دولت چین طرح‌های یارانه ای را برای ترویج خرید خودروهای برقی بررسی کرده است. در ایالات متحده، دولت‌های فدرال و ایالتی مشوق‌های مالیاتی و پرداخت‌های مستقیم ارائه کردند (دولت فدرال اعتبار مالیاتی تا سقف ۷۵۰۰ دلار آمریکا را اجرا کرد) تا استفاده از خودروهای الکتریکی را تشویق کند [۱۱]. در آلمان، دولت به خریداران خودروهای الکتریکی و تولیدکنندگان این خودروها یارانه اختصاص می‌دهد[۱۲].

این پژوهش، یک زنجیره تامین خودرو که شامل تولیدکننده‌ای است که خودروهای الکتریکی و بنزینی تولید می‌کند را بررسی می‌کند. این زنجیره تامین شامل یک خرده فروش نیز هست که محصول نهایی را به بازار می‌رساند. رقابت استکلبرگ در این زنجیره‌تامین برقرار است که در آن دولت پیشرو یا رهبر بازی است، تولیدکننده دولت را دنبال می‌کند و خرده فروش هر دو را دنبال می‌کند. خط زمانی به

این شرح قابل تشریح است: ابتدا دولت تصمیمات خود را در راستای اهداف پایداری اعلام می‌کند. این سیاست، می‌تواند یکی از پنج سیاست تعریف شده در این پژوهش باشد. علاوه بر ابزاری نظیر قانون کنترل وتجارت، دولت از ابزار مالیات ویارانه استفاده خواهد کرد. تولیدکننده تصمیماتی نظیر قیمت کارخانه (تولیدکننده) برای هر محصول را در کنار میزان سرمایه گذاری در فناوری سبز بر اساس سیاست اجرایی دولت اعلام می‌کند. خرده فروش حلقه نهایی در زنجیره تامین است که خودروها را مستقیماً به مشتریان می‌فروشد. برمبنای نظریه‌ی بازی، تابع سود هر بازیکن تعریف شده و سعی در بدست آمدن نقاط تعادلی خواهیم داشت. با استفاده از فرضیات ذکر شده، در این پژوهش به سوالات زیر پاسخ داده خواهد شد:

الف) با توجه به مفروضات بیان شده در این پژوهش، قیمت‌های اعلام شده برای خرده فروش و تصمیم (مانند میزان انتشار مجاز کربن، یارانه خودروهای الکتریکی و مالیات خودروهای بنزینی چقدر خواهد بود؟

د) تصمیمات دولت، چه تاثیری بر تصمیمات تولیدکننده چقدر است؟

ب) میزان سرمایه گذاری سبز توسط تولیدکننده چقدر است و چه میزان بر آلودگی و همچنین میزان تقاضای بازار تأثیر می‌گذارد؟

ج) تأثیرات هر یک از سیاست‌های مختلف دولت بر اعضای زنجیره‌ی تامین چیست و میزان هر و سود اعضای زنجیره‌ی تامین می‌گذارد؟

در ادامه بخش‌های این پژوهش به این شرح نگارش شده است: در بخش ۲- پژوهش‌های پیشین مورد مطالعه‌ی عمیق قرار گرفته و جمع بندی مناسبی ارائه شده است. در بخش ۳-، مدل سازی ریاضی ارائه شده است. در بخش ۴-، نتایج مدل ارائه شده و در بخش ۵- تحلیل‌های پارامتیک و بینش‌های مدیریتی مناسب آن ارائه شده است. بخش ۶-، نتایج عددی را جمع بندی می‌کند. در انتهای این پژوهش، نتیجه گیری این تحقیق ارائه شده است.

۲- ادبیات موضوع

همانطور که در مقدمه اشاره شد، این پژوهش مبتنی بر بهینه سازی زنجیره تامین خودروی الکتریکی، خودروی بنزینی، قیمت گذاری، سیاست مالیات و یارانه و همچنین سیاست کنترل و تجارت استوار است. پیشینه‌ی پژوهش این مفاهیم در این فصل مورد مطالعه‌ی دقیق قرار خواهد گرفت.

۲-۱- تصمیمات قیمت گذاری در زنجیره‌ی تامین خودروهای الکتریکی

تیان و همکاران [۱۳]، در پژوهش خود استراتژی‌های حمله پویا و تنوع را در شبیه‌سازی ارزیابی طرح مدیریت شهری در نظر گرفتند. برای این منظور، از نظریه بازی تکاملی برای مدل‌سازی فرآیند تکامل استراتژی‌های حمله کاربران مخرب را استفاده کردند و روش‌شناسی شبیه‌سازی‌های را مورد بحث قرار دادند.

فنگ و همکاران [۱۴]، یک برنامه مبتنی بر مشارکت عمومی-خصوصی را پیشنهاد دادند که برای ترویج استفاده از انرژی خورشیدی، شرکت‌های سرمایه‌گذاری را تشویق می‌کند تا با نصب پنل‌های خورشیدی روی پشت بام به منظور ارائه‌ی انرژی به کاربران وسایل نقلیه الکتریکی، با ساکنان همکاری کنند. به منظور تجزیه و تحلیل تمایل هر یک از ذینفعان شرکت کننده در چنین برنامه ای، در پژوهش آن‌ها یک مدل بازی تکاملی با در نظر گرفتن سه جمعیت ارائه شده است.

لاها و همکاران [۱۵]، در پژوهش خود، مسئله‌ی شارژ را در یک سیستم حمل‌ونقل هوشمند، که تشکیل شده از ایستگاه‌های شارژ مجهز به شبکه هوشمند و خودروهای الکتریکی شبکه‌شده است، مورد پژوهش قرار دادند. در پژوهش آن‌ها، هدف هر وسیله نقلیه انتخاب ایستگاهی با کمترین هزینه شارژ با در نظر گرفتن قیمت شارژ و موقعیت مکانی آن است، در حالی که هدف هر ایستگاه شارژ با توجه به استراتژی شارژ وسایل نقلیه، به حداکثر رساندن درآمد خود است. آن‌ها از یک بازی استکلبرگ چند رهبر چند نفره برای مدل‌سازی تعامل بین وسایل نقلیه و ایستگاه‌های شارژ استفاده کردند، که در آن عامل مکان نقش مهمی ایفا می‌کند.

هو و همکاران [۱۶]، بر پایه‌ی رویکرد نظریه بازی تکاملی پژوهشی را ارائه دادند که از مدل شبکه «جهان کوچک[۳]» نیومن و واتس برای بررسی اثرات پویای سیاست‌های مختلف بر انتشار وسایل نقلیه الکتریکی استفاده می‌کند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سیاست یارانه خرید دولت و سیاست سفر محدود می‌تواند نرخ انتشار آلاینده خودرو را تا ۶۰ درصد ارتقا دهد و اثر کوتاه‌مدت آن قابل‌توجه است.

یو و همکاران [۱۷]، در پژوهش خود، مدل بازی بیزی تجارت انرژی ریزشبکه را ارائه دادند. مدل آن‌ها مبتنی بر بازی بیزی است که در آن ریزشبکه‌ها تصمیم خود را به عنوان عاملی از کاربران بومی برای مقابله با تجارت انرژی دو طرفه بین دیگران می‌گیرند. در پژوهش آن‌ها، با استفاده از بازی بیزی، نقش‌های بازیکنان بر پایه‌ی عدم قطعیت اطلاعات از جمله ویژگی‌های تصادفی خودروهای الکتریکی مدل شده است.

راستی و مون [۶] در مطالعه ی خود به بررسی موضوع قیمت‌گذاری خودروهای الکتریکی و همچنین تعیین میزان پیشرفت‌های تکنولوژیکی خودروهای الکتریکی می‌پردازد. علاوه بر این، به چهار هدف مهم در راستای برنامه‌های پایداری دولت از جمله تعداد خودروهای الکتریکی، کاهش انتشار، درآمد دولت و مازاد مشتری [۴] نگاه می‌کند. دو استراتژی شامل استراتژی بهینه‌سازی مالیاتی[۵] و یک استراتژی بهینه‌سازی یارانه [۶]، در این مطالعه به عنوان راه‌هایی برای رسیدن به چهار هدف با یافتن مقادیر بهینه برای چهار متغیر تصمیم‌گیری پیشنهاد شده‌اند.

والوجیانی و همکاران [۳] از طریق شبیه‌سازی‌های کالیبره‌شده با داده‌های دنیای واقعی نشان دادند که رویکردهای فعلی قیمت‌گذاری برق در توانایی آنها برای القای پروفایل‌های تقاضای مورد نظر محدود است. برای مقابله با این چالش، در این پژوهش قیمت‌گذاری تطبیقی را ارائه کردند که روشی است برای یادگیری از واکنش‌های مللک خودروهای الکتریکی به قیمت‌ها و تنظیم قیمت‌های اعلام‌شده.

ژو و همکاران [۱۸] یک بازی دو سطحی از نوع استکلبرگ را ارائه دادند که تعامل بین متقاضیان وسیله نقلیه و دولت را برای تعیین تعداد بهینه خودروهای الکتریکی تحت سیاست کنترل پلاک در پکن به تصویر می‌کشد. تعداد پلاک‌های تعادلی خودروهای الکتریکی برگرفته از مدل استکلبرگ آن‌ها ۵۸۸۰۰ عدد است که می‌تواند رفاه اجتماعی را ۰.۳۸ درصد افزایش دهد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل حساسیت برای نشان دادن تأثیر عوامل مهم نظیر سهمیه کل پلاک، هزینه کرایه وسیله نقلیه و قیمت انرژی، بر پذیرش خودروی الکتریکی در پژوهش آن‌ها انجام شده است. سیاست کنترل پلاک تحت تاثیر ویروس کرونا نیز از طریق تجزیه و تحلیل سناریو مورد مطالعه آن‌ها قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که اگر دولت به میزان ۲۰۰۰۰ عدد، تعداد سهمیه کل را افزایش دهد، ۲۴ درصد از این تعداد می‌تواند به خودروی بنزینی و ۷۶ درصد به خودروی الکتریکی اختصاص یابد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که کاهش یک سوم هزینه اجاره خودرو می‌تواند پلاک خودروهای الکتریکی را تا ۱۰.۵ درصد افزایش دهد. نتایج آن‌ها نشان داد که از نظر قیمت انرژی، زمانی که قیمت بنزین پایین است، کاهش قیمت برق می‌تولند به طور قلبل توجهی به پذیرش خودروهای الکتریکی کمک کند، در حالی که با افزایش قیمت بنزین، این اثر کاهش می‌یابد.

چاکروبورتی و همکاران [۱۹] با استفاده از رویکرد تئوری بازی، تأثیر استفاده از ترکیب یارانه خودروهای الکتریکی و مالیات سبز بر وسایل نقلیه بنزینی معمولی را بر رفاه کلی اجتماعی، اثرات زیست‌محیطی و موجودی وسایل نقلیه در اشکال انحصاری و دوپولی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیبی از یارانه و مالیات سبز می‌تواند رفاه اجتماعی بالاتری را در مقایسه با استفاده از تنها یکی از آنها در هر دو بازار انحصاری و دوپولی ایجاد کند.

وو و بائه [۲۰] ر پژوهش خود تلاش کرده‌اند به وسیله ی بهینه‌سازی پارتو [۷]، مسئله ی ساخت تسهیلات شارژی الکتریکی به‌منظور دست‌یابی به سرویس با کیفیت بالا و البته قیمت پایین را، ارزیابی کنند . دو استراتژی در ویژگی‌هایی نظیر کاهش هزینه و منعطف بودن در برابر عدم قطعیت تقاضا بررسی شده عبارت هستند از استرتژی مدیریت ایستای تقاضا و مدیریت همراه تقاضا[۸].

ژائو و همکاران [۲۱] از یک مدل بازی غیرهمکارانه برای تعیین قیمت اشتراک شمع شارژ با توجه به رفتارهای مصرف کنندگان خودروهای الکتریکی استفاده کردند. ابتدا، یک مدل چند لاجیت[۹] برای بررسی رفتار مصرف‌کنندگان خودروهای الکتریکی ساخته می‌شود. سپس، یک مدل بازی دو ماتریسی بین اشتراک‌گذاری شمع شارژ خصوصی و حالت شارژ عمومی ایجاد می‌شود.

یو و همکاران [۲۲] یک زنجیره‌تامین خرده‌فروشی چهار سطحی خودرو متشکل از دولت، یک تولیدکننده، یک خرده‌فروش و مشتریان را بررسی می‌کنند.

وانگ و همکاران[۲۳] یک استراتژی قیمت گذاری برای عامل خودروی الکتریکی پارک تحت پس زمینه «اوج کربن و خنثی سازی کربن[۱۰]» ارائه دادند. در این پژوهش یک مدل بازی دو سطحی استکلبرگ توسعه داده شد که در آن سطح بالا، سود عامل خودروی الکتریکی پارک را به حداکثر می‌رساند و سطح پایین‌تر هزینه شارژ صاحبان خودروهای الکتریکی را به حداقل می‌رساند.

لی و همکاران [۲۴]در پژوهش خود، یک مدل تحلیلی را برای مطالعه تأثیر اضطراب خودروی الکتریکی[11] و مزایای زیست‌محیطی خودروهای برقی بر تصمیم‌های بهینه یارانه و قیمت‌گذاری را ارائه کردند. آن‌ها بازاری را متشکل از یک تولیدکننده خودرو، یک برنامه ریز اجتماعی و دو بخش از مصرف کنندگان را در نظر گرفتند که شامل خریداران سبز و غیر سبز است. هر دو بخش دارای نگرانی در استفاده‌ی خودروی الکتریکی هستند. تولیدکننده هم خودروهای برقی و هم خودروهای سنتی را تولید و به فروش می‌رساند. در مدل آن‌ها تصمیمات خرید خودروهای برقی تحت تاثیر اضطراب مصرف کنندگان خودروهای الکتریکی، ترجیح خودروهای برقی، میزان یارانه خودروهای الکتریکی و قیمت‌های خرده فروشی خودروهای برقی و خودروهای معمولی موجود در بازار است. نتایج آن‌ها ضرورت برنامه یارانه‌ای در ارتقای فروش خودروهای الکتریکی را توجیه می‌کند.

۲-۲- سیاست کنترل و تجارت و مدیریت زنجیره تامین سبز

لیو و همکاران [۲۵] تاثیر رقابت و آگاهی محیطی مصرف کنندگان بر بازیگران کلیدی زنجیره تامین را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نه تنها رقابت تولیدی بین محصولات نیمه قابل تعویض ساخته شده توسط تولیدکنندگان مختلف، بلکه رقابت بین فروشگاه‌های خرده فروشی را در نظر گرفتند. آن‌ها از مدل‌های بازی دو مرحله‌ای استکلبرگ برای بررسی پویایی بین بازیکنان زنجیره تامین با توجه به سه ساختار شبکه زنجیره تامین استفاده کردند.

سونگ و همکاران [۲۶] یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای را برای مطالعه مشکل گسترش ظرفیت در لجستیک تحت قوانین کنترل و تجارت و مالیات کربن توسعه دادند. تصمیمات بهینه میزان گسترش ظرفیت و تولید در این پژوهش به دست آمده و اثرات مقررات انتشار کربن بر گسترش ظرفیت مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

هونگ و همکاران [۲۷] در پژوهش خود، پایداری محیطی را به عنوان یک معیار مهم برای ارزیابی موفقیت مدیریت زنجیره تامین معرفی کردند. در این پژوهش، چندین قرارداد همکاری در یک زنجیره تامین محصول سبز مطالعه شده و عملکرد زیست محیطی آنها نیز بررسی شده است. مسئولیت‌های زیست‌محیطی ذینفعان در یک زنجیره تامین دو سطحی به عنوان معیاری در نظر گرفته شده که در آن مصرف‌کنندگان نسبت به نگرانی‌های زیست‌محیطی آگاه هستند. همچنین مدل آن‌ها یک تولیدکننده که محصول سبز را طراحی و تولید می‌کند، و یک خرده‌فروش محصول سبز را که در بازار خود از طریق بازاریابی سبز تبلیغ می‌کند را شامل می‌شود. این مسئله تحت سه قرارداد به منظور افزایش سطح همکاری تحلیل و مدل‌سازی می‌شود.

گیلانی و همکاران [۲۸] یک مدل بهینه‌سازی طراحی شبکه زنجیره تامین استوار[12] سه فازی را برای تولید بیواتانول از نیشکر پیشنهاد کردند. در پژوهش آن‌ها روش تحلیل پوششی داده‌های یکپارچه فازی برای انتخاب اراضی زیر کشت مناسب به‌عنوان نقاط بالقوه عرضه به کار گرفته شده است. این مدل در اجرای خود پایداری را مد نظر قرار می‌دهد به طوری که اهداف به حداکثر رساندن سود، به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی و به حداکثر رساندن عملکرد اجتماعی مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجایی که برخی از پارامترها به طور طبیعی نامشخص هستند، یک مدل برنامه ریزی احتمالی استوار با در نظر گرفتن احتمال اختلالات حمل و نقل پیشنهاد شده است. عملکرد مدل از طریق مطالعه موردی در ایران نشان داده شده است. در نهایت، نتایج مدل ریاضی نشان داده است که طراحی زنجیره تامین پیشنهادی قابل توجیه است. بینش‌های استراتژیک عملی شامل توصیه‌هایی برای مکان یابی پالایشگاه‌ها در هفت استان (گیلان، کرمانشاه، همدان، سمنان، خراسان رضوی، خوزستان، کیهکلیه) است. این نتایج با استفاده از یک رویکرد مبتنی بر شبیه‌سازی تایید شده‌اند، که نشان می‌دهد مدل پیشنهادی تصمیماتی را توصیه می‌کند که از نظر میانگین و انحراف استاندارد مقادیر هدف مناسب‌تر از مدل قطعی هستند.

کشاروانی و همکاران [۲۹] پایداری اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی هنگام بازسازی زنجیره تامین سوخت زیستی از به کارگیری فناوری تولید نسل اول به فناوری نسل دوم با در نظر گرفتن زیرساخت‌های زنجیره تامین موجود، تجزیه و تحلیل و کمی سازی کردند. دو استراتژی بازسازی زنجیره تامین، یعنی استقرار پیش پردازش توزیع شده و متمرکز، برای اجرای پیش پردازش زیست توده برای تولید سوخت زیستی نسل دوم مدل‌سازی شده‌اند. فرمول‌های بهینه‌سازی دو هدفه برای زنجیره تامین سوخت زیستی با منبع ذرت (یک سوخت زیستی نسل دوم معمولی) با در نظر گرفتن هر دو جنبه اقتصادی و زیست‌محیطی تحت هر دو استراتژی پیشنهاد شده‌اند. متغیرهای تصمیم گیری مختلف مانند مکان‌های انتخاب شده برای ساخت مراکز پیش فرآوری و ظرفیت‌های مدیریت ذرت مربوطه در چنین مراکزی، و همچنین جریان مواد بین مزارع، مراکز پیش فرآوری، و کارخانه‌های زیست پالایشگاه شناسایی می‌شوند.

فنگ و همکاران [۳۰] قوانین تخصیص سود را برای سفارش‌دهی مشترک در بین خرده فروشان تحت یک سیاست محدودیت کربن کنترل و تجارت مطالعه کردند. آن‌ها رفتار نوع دوستانه خرده فروشان را هنگام طراحی قوانین تخصیص سود در نظر گرفتند. آن‌ها نشان دادند که سفارش‌دهی مشترک می‌تواند سود کل شرکت‌کنندگان را افزایش دهد و میزان کل انتشار کربن را کاهش دهد.
تانگ و همکاران [۳۱] یک زنجیره تامین کم کربن متشکل از یک تولیدکننده با سرمایه محدود و یک خرده‌فروش با سرمایه فراوان را مدل می‌کنند که در آن وام‌های بانکی و پرداخت زودهنگام مورد بررسی قرار می‌گیرد. نویسندگان نشان دادند که تحت هر ساختار قدرت، همیشه یک تعادل تامین مالی (یعنی پرداخت زودهنگام) وجود دارد. در مقایسه با وام‌های بانکی، پرداخت زودهنگام می‌تواند انتشار کربن کمتر و رفاه اجتماعی بالاتری را در ساختار قدرت خرده فروش ایجاد کند. اما به محیط زیست و رفاه اجتماعی آسیب می‌رساند و منجر به تضاد بین سودآوری و اهداف زیست محیطی در مورد تولیدکننده می‌شود.
رین وهمکاران [۳۲] با فرض این که نقش شرکت‌ها و سیاست در پرداختن به این مسئله‌ی دفع بی‌رویه‌ی پسماند به طور فشرده مورد بحث قرار گرفته است، تمرکز خود را بر روی نقش مصرف کنندگان قرار داده‌اند. پژوهش آن‌هاآگاهی مصرف کنندگان از بسته بندی پلاستیکی را با پیروی از یک رویکرد استقرایی و متمایزتر بررسی می‌کند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مصرف کنندگان بسته بندی پلاستیکی را با مشکلاتی بسیار بیشتر از محیط زیست مرتبط می‌دانند. آن‌ها پنج نوع مختلف از آگاهی مصرف کنندگان را شناسایی کردند. نتایج به دستیابی به درک گسترده‌تری از مصرف‌کنندگان کمک می‌کند و در نتیجه به توسعه استراتژی‌های مؤثرتری کمک می‌کند که مصرف‌کنندگان را قادر می‌سازد تا از پلاستیک به روشی پایدارتر استفاده کنند. اگرچه پشیینه‌ی پژوهش به این نتیجه رسیده است که خریداران می‌توانند بر تامین کنندگان برای اتخاذ شیوه‌های پایدار تأثیر بگذارند. با این حال، بسیاری از این ادبیات، فقط دیدگاه خریدار را در نظر می‌گیرند که سعی می‌کند پایداری را در پایه عرضه خود منتشر کند.
ساندرز و همکاران [۳۳] در راستای ادبیات یک مدل ریاضی تجویزی را تقویت می‌کند که درآمد مورد انتظار تامین‌کننده را از ارائه پیشنهاد به خریدار بزرگ، شامل معیار پایداری، به حداکثر می‌رساند. به طور خاص، مدل آن‌ها از تئوری تصمیم برای تعیین سطح بهینه پایداری برای ادغام در یک پیشنهاد برای ایجاد تعادل اقتصادی در مقابل مبادلات پایدار بر اساس ترجیح خریدار ادراک شده استفاده می‌کند. برای نشان دادن کاربرد این مدل، سپس برای یک سناریوی غنی، با استفاده از داده‌های یک تامین‌کننده صنعتی که برای قراردادی برای توزیع یک ماده افزودنی سوخت در برزیل با متعادل کردن تعادل بین کاهش انتشار کربن و افزایش هزینه توزیع، پیشنهاد داده است، به کار رفته است. سپس یک تجزیه و تحلیل حساسیت انجام شده تا نشان دهد که چگونه اشکال مختلف تابع سود خریدار بر انتشار پایداری در پیشنهادات تامین کننده بهینه تأثیر می‌گذارد.

۲-۳- نتیجه گیری

درراستای ارائه‌ی جمع بندی در ادبیات موضوع، با بررسی پژوهش‌های پیشین، جدول (۱) رائه می‌شود. با توجه به پژوهش‌های پیشین، شکاف تحقیقاتی مهمی در راستای بررسی همزمان زنجیره‌تامین خودروهای بنزینی و الکتریکی متشکل از خرده فروش و تولیدکننده به گونه‌ای که دولت در راستای رسیدن به اهداف پایداری تصمیمات خود را بهینه می‌کند و درنتیجه سیاست‌های مالیات و یارانه و کنترل و تجارت را اعمال می‌کند وجود دارد که سعی شده است در این پژوهش، کمبود پژوهش‌های پیشین بررسی، مدل و تحلیل شود. ماهیت رقابتی زنجیره تامین‌کالا ها، خصوصا در شرایطی که کالای نوینی روانه‌ی بازار است و به دنبال پیدا کردن راهکاری به منظور تثبیت سهم خود از بازار در شرایطی که کالای غیر زیست محیطی دیگر دارای ثبات بهتر و بیشتری است، محققان این حوزه را بر آن داشته که از رویکرد نظریه بازی در این پژوهش استفاده کند.

۳- تعریف مسئله و مدل سازی ریاضی

۱-۳- تعریف مسئله

همانطور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، در مسئله‌ی نخست این پژوهش یک زنجیره تامین متشکل از دولت، تولیدکننده و خرده فروش بررسی می‌شود. این تولیدکننده انواع مختلفی از وسایل نقلیه را تولید می‌کند: خودروهای الکتریکی (به عنوان محصول زیست‌محیطی) و خودروهای بنزینی.

جدول (۱): پژوهش‌های پیشین

	خودروی الکتریکی	خودروی بنزینی	دولت	تولیدکننده	خرده فروش	قیمت گذاری	کنترل و تجارت	نظریه بازی
لی و همکاران [۲۴]	✔	✔	✔	✔		✔		✔
وانگ و همکاران [۲۳]	✔		✔	✔		✔	✔	✔
کندی و همکاران [۳۴]				✔	✔	✔		✔
ژیا و همکاران [۳۵]				✔	✔	✔	✔	✔
راستی و همکاران [۶]	✔	✔	✔	✔		✔		✔
یو وهمکاران [۲۲]	✔		✔	✔	✔	✔		✔
چکروبروتی و همکاران [۱۹]	✔	✔				✔*		✔
جهانگیر و همکاران [۳۶]	✔					✔		
پژوهش حاضر	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔

*در این پژوهش ها، متغیرهای مذکور به عنوان پارامتر دیده شده است

در این پژوهش فرض شده است که تولیدکننده با استفاده از فناوری زیست محیطی و سبز سعی می‌کند انتشار کربن ناشی از فرآیندهای تولید را کاهش دهد. علاوه بر این، در کنار دو بازیکن دیگر معرفی شده، یک خرده فروش در سطح نهایی زنجیره تامین وجود دارد که هر دو نوع خودروی مذکور را به فروش می‌رساند.

یکی از مهم ترین مفروضات مدل این مسئله، سیاست کنترل و تجارت است. این بدان معناست که در حالی که دولت محدودیت ردپای کربن را اعمال می‌کند، تولیدکننده نمی تواند بیش از مقدار معینی آلاینده را آزاد کند. در نتیجه اگر تولیدکننده در طول فرآیند تولید، آلاینده باعث انتشار کربن بیش از مقدار تعیین شده شود، باید مابه التفاوت را به قیمت واحد۱۳ پرداخت کند. فرض قابل توجه دیگر در این پژوهش، سیاست مالیات و یارانه از سوی دولت است. دولت تولیدکننده را ملزم به پرداخت مالیات برای تولید خودروهای بنزینی می‌کند و در عین حال برای تولید هر خودروی برقی یارانه‌ای را به تولیدکننده اختصاص می‌دهد تا مزیت رقابتی قابل توجهی را کسب کند. جدول (۲) پارامترها و متغیرها را نشان می‌دهد.

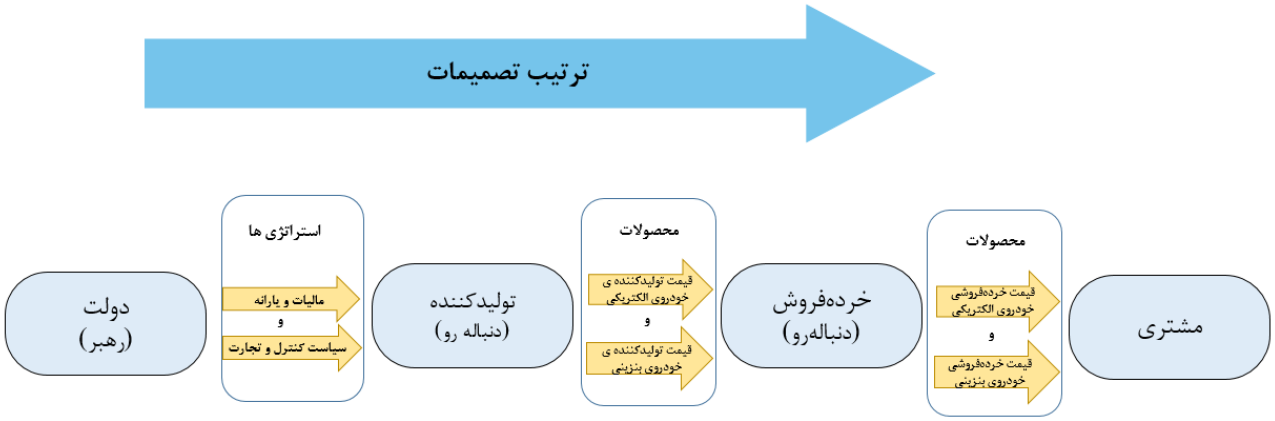
با فرض رقابت از نوع استکلبرگ در این زنجیره تامین بین تولیدکننده و خرده فروش، در این پژوهش از یک رویکرد نظریه بازی برای تجزیه و تحلیل این زنجیره تامین خودرو استفاده خواهد شد. خرده فروش سعی می‌کند با تعیین قیمت خرده فروشی خودروی بنزینی و خودروی الکتریکی سود خود را به حداکثر برساند. همچنین تولیدکننده می‌خواهد با تعیین قیمت کارخانه برای هر دو محصول و سرمایه‌گذاری سبز سود خود را به حداکثر برساند. علاوه بر این، دولت (به عنوان رهبر استکلبرگ) استراتژی‌های متفاوتی (که در توابع هدف مدل شده اند) اعمال خواهد کرد. برای اجرای این سیاست‌ها، دولت ابزارهای خاصی را طراحی کرده است. یکی از این ابزارها، اعمال سیاست کنترل و تجارت است که تولیدکننده را محدود به انتشار مقدار مشخصی از آلاینده‌ها می‌کند. ابزار دیگر، سیاست یارانه و مالیات است که هر دو کالا (برای خودروی الکتریکی یارانه و برای خودروی بنزینی مالیات) اعمال می‌شود. باید توجه داشت که سرمایه‌گذاری سبز در روند تولید، نه تنها به زنجیره تامین کمک می‌کند تا تولید را سازگار با محیط زیست نگه دارد و تقاضای کل را افزایش می‌دهد، بلکه به تولیدکننده کمک می‌کند تا به سهمیه انتشار آلودگی کمتری در کنترل و تجارت نیاز داشته باشد. شکل (۱) شماتیک تصمیمات بازیکنان را به ترتیب توضیح می‌دهد. فلش نشان داده شده در بالای شکل، بیانگر ترتیب تصمیمات و قدرت در اعمال تصمیمات است.

جدول (۲): نمادها

پارامترها	واحد محاسباتی	
α	نفر	پایه‌ی بازار
ζ	نفر / واحدپولی	ضریب الاستیسیسته‌ی قیمت در تقاضا
μ	نفر	ضریب الاستیسیسته‌ی سرمایه‌گذاری سبز در تقاضای خودرو
υ	نفر / پولی واحد	ضریب الاستیسیسته‌ی قیمت خودروی رقیب در تقاضای خودرو
θ	کیلوتن	تاثیر سرمایه‌گذاری سبز در کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی
BFP	کیلوتن	آلاینده‌ی کربنی که بدون سرمای‌گذاری سبز منتشر می‌شود
ETU	پولی واحد	قیمت هر واحد سهمیه آلاینده‌ی کربنی
κ	واحدپولی	قیمت هرواحد افزایش در سرمایه گذاری سبز
β_1	$\frac{۱}{}$ نفر / واحدپولی	ضریب تبدیل ارزش مازاد مشتری به معادل مالی آن
β_2	نفر / واحدپولی	ضریب تبدیل ارزش سیاست‌های سبز ر نظر گرفته شده در تابع سود سبز نخست به معادل مالی آن
β_3	نفر / واحدپولی	ضریب تبدیل ارزش سیاست‌های سبز ر نظر گرفته شده در تابع سود سبز دوم به معادل مالی آن

متغیرهای تصمیم	واحد محاسباتی	
p_1	واحدپولی	قیمت نهایی خودروی الکتریکی
p_2	واحدپولی	قیمت نهایی خودروی بنزینی
w_1	واحدپولی	قیمت کارخانه‌ی خودروی الکتریکی
w_2	واحدپولی	قیمت کارخانه‌ی خودروی بنزینی
e	—	سرمایه‌گذاری سبز انجام شده توسط تولیدکننده
s	واحدپولی	یارانه‌ی تخصیص داده شده بر خودروی الکتریکی
t	واحدپولی	مالیات تخصیص داده شده بر خودروی بنزینی
EAG	کیلوتن	میزان مجاز انتشار کربن که توسط دولت تعیین می‌شود

متغیرهای وابسته	واحد محاسباتی	
D_1	نفر	تقاضای خودروی الکتریکی
D_2	نفر	تقاضای خودروی بنزینی
Π_R	واحدپولی	تابع سود خرده فروش
Π_m	واحدپولی	تابع سود تولیدکننده
Πg_{CS}	واحدپولی	تابع سود سیاست مازاد مشتری دولت
Πg_{G1}	واحدپولی	تابع سود سیاست سبز نخست دولت
Πg_{G2}	واحدپولی	تابع سود سیاست سبز دوم دولت
Πg_F	واحدپولی	تابع سود سیاست مالی نخست دولت
Πg_C	واحدپولی	تابع سود سیاست سبز ترکیبی دولت



شکل (۱): شماتیک تصمیمات مدل

به منظور جمع بندی، فرضیات مسئله به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- زنجیره‌ی تامین شامل دولت، یک تولیدکننده و یک خرده فروش است
- در این بازی، رقابت از نوع استکلبرگ است
- تولیدکننده هر دو نوع خودرو را تولید می‌کند: الکتریکی و بنزینی
- دولت از سیاست‌های کنترل و تجارت در کنار یارانه و مالیات به عنوان ابزاری در راستای استراتژی‌های پایدار استفاده می‌کند
- تولیدکننده از سرمایه‌گذاری بر روی تکنولوژی سبز در فرآیند تولید به منظور کاهش آلاینده‌ها و افزایش بازارپسندی محصول خود استفاده می‌کند
- تولیدکننده، مجاز به انتشار میزان مشخصی از آلاینده‌ها می‌باشد. مقدار بیش از این حد مجاز مشخص شده مشمول جریمه می‌شود.
- دولت تصمیماتی نظیر میزان انتشار مجاز آلاینده‌ها، مالیات خودروهای بنزینی و یارانه برای خودروی الکتریکی را اتخاذ می‌کند
- تصمیمات تولیدکننده عبارت هستند از: تصمیمات قیمت گذاری برای خودروهای تولیدی و میزان سرمایه گذاری بر روی فرآیند تولید سبز.
- تصمیمات خرده فروش قیمت گذاری هر دو نوع خودرو است

۳-۲- مدل سازی ریاضی

بر همین مبنا، توابع هدف خرده فروش، تولیدکننده نوشته می‌شود:

$$\Pi_R = (p_1 - w_1) \times D_1 + (p_2 - w_2) \times D_2 \quad (۱)$$

$$\Pi_M = (w_1 - c_1)\, D_1 - \kappa \frac{e^2}{2} + \Big(ETU\big(EAG - (BFP - \theta\, e)\big)\Big) + (w_2 - c_2)\, D_2 \quad (۲)$$

در تابع سود خرده فروش که در رابطه‌ی (۱) آمده است، این سود تشکیل شده از حاشیه سود فروش هر دو خودرو است. تابع سود تولیدکننده که در رابطه‌ی (۲) آمده است، سود حاشیه‌ای تولید خودروهای الکتریکی، سود حاشیه‌ای تولید خودروهای بنزنی، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سبز در روند تولید، هزینه‌ی سیاست کنترل و تجارت می‌باشد. همچنین همان‌گونه که اشاره شد، از مفروضات مسئله این است که تقاضای خودروی الکتریکی تابعی از اندازه بازار ، قیمت نهایی، قیمت خودروی بنزینی به عنوان محصول رقابتی، تلاش‌های سبز که توسط تولیدکننده انجام می‌شود است. همچنین ، با استدلالی مشابه، تقاضای خودروی بنزینی مبتنی بر اندازه بازار ، قیمت نهایی، قیمت خودروی الکتریکی به عنوان محصول رقابتی و تلاش‌های سبز خواهد بود. بر این اساس ، تقاضا برای هر محصول با افزایش قیمت محصول رقیب و کاهش انتشار کربن ناشی از بهبود خط تولید از طریق تلاش‌های سبز باتوجه به به ضریب کشش آن‌ها افزایش می‌یابد. تقاضا برای دو کالا در روابط (۳) و (۴) نشان داده شده است:

$$D_1 = \alpha - \zeta(p_1 - s) + \upsilon(p_2 + t) + (\mu\, e) \quad (۳)$$

$$D_2 = \alpha + \upsilon(p_1 - s) - \zeta(p_2 + t) + (\mu\, e) \quad (۴)$$

در این پژوهش، پنج استراتژی که در توابع هدف مدل شده اند، در نظر گرفته می‌شود. ترکیب مازاد مصرف کننده[۱۴] و درآمد دولت اولین تابع هدف است که توسط دولت تعریف شده است. در این تابع سود، دولت در تلاش است که با تبدیل مفهوم مازاد مشتری به ارزش مالی آن، سود خودرا بیشینه کند. رابطه‌ی (۵) نشان می‌دهد که چگونه مازاد مصرف کننده در کنار درآمد مالی برای دولت تعریف شده است. روابط (۶) و (۷) دو تابع سود زیست‌محیطی و چگونگی ترجیح دولت برای به حداکثر رساندن سرمایه گذاری سبز تولیدکننده را نشان می‌دهند. در سیاست زیست محیطی نخست، دولت در تلاش است که در کنار افزایش درآمد مالی خود، میزان سرمایه‌گذاری سبز (باتوجه به تقاضای آن) بیشینه شود. رابطه‌ی (۸) تابع سود مالی را نشان می‌دهد، که فقط سیاست مالی و بودجه در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، رابطه‌ی (۹) یک تابع سود ترکیبی است که به سیاستی می‌پردازد که در آن برخی مفاهیم قبلی مورد توجه دولت قرار گرفته است. نکته‌ی مهم این است که تمام توابع هدف به صورت درآمدی تعریف شده اند به این صورت که مفاهیم کیفی همانند پایداری به گونه‌ی هزینه‌ها و درآمد تبدیل می‌شود. این توابع به صورت زیر مدل شده اند:

$$\Pi g_{CS} = \beta_1\left(\left({D_1}^2 + {D_2}^2\right)/(2\,\zeta)\right) + (tD_2 - sD_1) \quad (۵)$$

$$\Pi g_{G1} = \beta_2(eD_2 + eD_1) + (tD_2 - sD_1) \quad (۶)$$

$$\Pi g_{G2} = \beta_3 e + (tD_2 - sD_1) \quad (۷)$$

$$\Pi g_F = tD_2 - sD_1 \quad (۸)$$

$$\Pi g_C = \beta_1\left(\frac{{D_1}^2 + {D_2}^2}{2\,\zeta}\right) + (tD_2 - sD_1) + \beta_2(eD_1 + eD_2) \quad (۹)$$

٤- نتایج مدل

در این بخش نقاط تعادلی و پاسخ‌های بهینه برای سرمایه گذاری سبز ، قیمت گذاری و مالیات ویارانه‌ها و همچنین میزان نرخ خرید و فروش سهمیه‌انتشار آلایندگی نشان داده خواهد شد. بر اساس ماهیت سلسله مراتبی بازی استکلبرگ، بدست آوردن نقاط تعادلی برای خرده‌فروش، گام نخست برای بدست آوردن نقاط تعادلی خواهد بود. این متغیرها عبارت هستند از قیمت خرده‌فروشی خودروی بنزینی و قیمت خرده‌فروشی خودروی الکتریکی. مقادیر بهینه بعداً در توابع سود تولیدکننده و دولت جایگزین خواهند شد. با جایگزینی پاسخ‌ها در تابع سود تولیدکننده، پاسخ‌های تولیدکننده که سرمایه‌گذاری سبز، قیمت خودروی الکتریکی تولیدکننده و قیمت خودروی بنزینی تولیدکننده هستند، به راحتی قابل دستیابی هستند. تمامی نتایج در بخش اثبات‌ها به تفضیل مورد بحث قرار گرفته‌اند.

گزاره‌ی ۱-۴: نقاط تعادلی خرده‌فروش در بازی استکلبرگ در رابطه‌ی (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است:

$$p_1^* = \frac{\alpha + e\mu + (s + w_1)(\zeta - \upsilon)}{2(\zeta - \upsilon)} \quad (۱۰)$$

$$p_2^* = \frac{\alpha - t\zeta + w_2\zeta + e\mu + t\upsilon - w_2\upsilon}{2\,\zeta - 2\,\upsilon} \quad (۱۱)$$

گزاره‌ی ۲-۴: مقادیر متغیرهای تولیدکننده در بازی استکلبرگ در نقطه تعادلی به گونه‌ای که پاسخ‌های خرده فروش در آن جایگذاری شده‌اند در روابط (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌اند:

$$e^* = \frac{2\,\alpha\mu + (4\,ETU\theta - (c_1 + c_2 - s + t)\mu)(\zeta - \upsilon)}{4\,\zeta\,\kappa - 2(\mu^2 + 2\,\kappa\upsilon)} \quad (۱۲)$$

$$w_1^* = \frac{1}{4}\left(2(c_1 + s) + \frac{4\,\alpha\kappa + \mu(4\,ETU\theta - (c_1 + c_2 - s + t)\mu)}{2\,\zeta\kappa - \mu^2 - 2\,\kappa\upsilon}\right) \quad (۱۳)$$

$$w_2^* = \frac{1}{4}(2(c_2 - t) + \frac{4\,\alpha\kappa + \mu(4\,ETU\theta - (c_1 + c_2 - s + t)\mu)}{2\,\zeta\kappa - \mu^2 - 2\,\kappa\upsilon} \quad (۱۴)$$

مرحله نهایی جایگزینی پاسخ‌های قبلی در دولت است. اما چهار تابع سود مختلف در این پژوهش تعریف شده که بدیهی است نتایج متفاوتی به عنوان مقادیر نقطه تعادلی خواهند داد.

گزاره‌ی ۳-۴: مقادیر بهینه‌ی دولت برای تابع سود مازاد مشتری در زنجیره تامین در روابط (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده اند:

$$t_{cs}^{*} = L1/\Big(\kappa(\zeta-\upsilon)\big((-8+\beta_1)\zeta+\beta_1\upsilon\big)\big((-8+\beta_1)\zeta^2\kappa+4\,\zeta\mu^2-2(-4+\beta_1)\zeta\kappa\upsilon+\beta_1\upsilon^2\big)\Big) \quad (۱۵)$$

$$s_{cs}^{*} = L2/\Big(\kappa(\zeta-\upsilon)\big((-8+\beta_1)\zeta+\beta_3\upsilon\big)\big((-8+\beta_3)\zeta^2\kappa+4\,\zeta\mu^2-2(-4+\beta_3)\zeta\kappa\upsilon+\beta_3\kappa\upsilon^2\big)\Big) \quad (۱۶)$$

گزاره‌ی ۴-۴: مقادیر بهینه‌ی دولت برای نخستین تابع سود زیست‌محیطی در زنجیره تامین در روابط (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده اند:

$$t_{G1}^{*} = \frac{-2\,ETU\theta\big(-2\,\zeta\kappa\mu+\mu^3+2\,\kappa\mu\upsilon+\beta_2(\zeta-\upsilon)(2\,\zeta\kappa+\mu^2-2\,\kappa\upsilon)\big)}{4\,\kappa(\zeta-\upsilon)(2\,\zeta\kappa-\beta_2\zeta\mu-\mu^2-2\,\kappa\upsilon+\beta_2\mu\upsilon)} + \left(\frac{\kappa}{4\,\kappa(\zeta-\upsilon)(2\,\zeta\kappa-\beta_2\zeta\mu-\mu^2-2\,\kappa\,\upsilon+\beta_2\,\mu\upsilon)}\right)\Big(-2\alpha(-2\,\zeta\,\kappa + 2\beta_2\,\zeta\,\mu+\mu^2+2\kappa\upsilon-2\,\beta_2\,\mu\,\upsilon) - (\zeta-\upsilon)\big(\,c_1\,\beta_2\mu(-\zeta+\upsilon) + c_2(4\,\zeta\kappa-3\;\beta_2\zeta\mu-2\mu^2-4\,\kappa\upsilon+3\beta_2\mu\upsilon)\big)\Big) \quad (۱۷)$$

$$s_{G1}^{*} = \left(\frac{1}{4\,\kappa(\zeta-\upsilon)(2\,\zeta\kappa-\beta_4\,\zeta\mu-\mu^2-2\,\kappa\upsilon+\beta4\mu\upsilon)}\right)\Big(2\,\alpha\,\kappa(-2\,\zeta\kappa+2\beta_2\zeta\mu+\mu^2 + 2\,\kappa\upsilon-2\beta_2\,\mu\,\upsilon) + 2\,ETU\,\theta\big(-2\,\zeta\kappa\mu+\mu^3+2\,\kappa\mu\upsilon+\beta_2(\zeta-\upsilon)(2\zeta\kappa+\mu^2-2\,\kappa\,\upsilon)\big)\Big) + \frac{+\kappa(\zeta-\upsilon)\big(\,c_2\beta_4\mu(-\zeta+\upsilon)+c_1(4\,\zeta\kappa-3\,\beta4\,\zeta\,\mu-2\mu^2-4\kappa\upsilon+3\beta_2\,\mu\,\upsilon)\big)}{4\,\kappa(\zeta-\upsilon)(2\,\zeta\,\kappa-\beta_4\zeta\mu-\mu^2-2\,\kappa\,\upsilon+\beta_2\,\mu\,\upsilon)} \quad (۱۸)$$

گزاره‌ی ۵-۴: مقادیر بهینه‌ی دولت برای دومین تابع سود زیست‌محیطی در زنجیره تامین در روابط (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده‌اند:

$$t_{G2}^{*} = \frac{\alpha\kappa-c_1\zeta\kappa-\beta_3\mu+ETU\;\theta\;\mu+c_2\kappa\upsilon}{2\,\zeta\,\kappa-2\,\kappa\,\upsilon} \quad (۱۹)$$

$$s_{G2}^{*} = \frac{1}{2}\left(c_1+\frac{\alpha\kappa-\beta_3\,\mu+ETU\;\theta\;\mu}{\kappa(-\zeta+\upsilon)}\right) \quad (۲۰)$$

گزاره‌ی ۶-۴: مقادیر بهینه‌ی دولت برای تابع سود درآمدی در زنجیره تامین در روابط (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده‌اند:

$$t_{F}^{*} = \frac{\alpha\kappa-c_2\,\zeta\,\kappa+\mathrm{ETU}\,\theta\,\mu+c_2\kappa\upsilon}{2\,\zeta\,\kappa-2\,\kappa\,\upsilon} \quad (۲۱)$$

$$s_{F}^{*} = \frac{1}{2}\left(c_1+\frac{\alpha\kappa+\mathrm{ETU}\,\theta\,\mu}{\kappa(-\zeta+\upsilon)}\right) \quad (۲۲)$$

گزاره‌ی ۷-۴: مقادیر بهینه‌ی دولت برای تابع سود ترکیبی در زنجیره تامین در روابط (۲۳) و (۲۴) نشان داده شده‌اند:

$$t_{C}^{*} = \frac{1}{2}\left(-2c_2+\frac{4(c_1-c_2)\zeta}{(-8+\beta_1)\zeta+\beta_1\upsilon}+\frac{\alpha\,\kappa+ETU\theta\mu}{\zeta\kappa-\kappa\upsilon} + \frac{4\alpha\beta_2\zeta\mu+\alpha\,\beta_1\,\kappa(\zeta-\upsilon)+ETU\theta(8\beta_2\zeta+\beta_1\mu)(\zeta-\upsilon)+2(c_1+c_2)\zeta(-2\,\zeta\kappa+\mu^2+2\,\iota}{\zeta\big((-8+\beta_1)\zeta\kappa+4\,\beta_1\,\zeta\mu+4\mu^2\big)-2\zeta\big(-4+\beta_1)\kappa+2\beta_2\mu\big)\upsilon+\beta_1\kappa\upsilon^2}\right) \quad (۲۳)$$

$$s_{c}^{*} = c_1+\frac{2(c_1-c_2)\zeta}{(-8+\beta_1)\zeta+\beta_1\upsilon}-\frac{\alpha\kappa+ETU\theta\mu}{2\,\zeta\kappa-2\,\kappa\upsilon} + \frac{-4\,\alpha\beta4\,\zeta\mu-ETU\theta(8\,\beta_2\zeta+\beta_1\mu)(\zeta-\upsilon)+\alpha\beta_1\kappa(-\zeta+\upsilon)+2(c_1+c_2)\zeta(2\,\zeta\kappa-\mu^2-2\,\kappa\upsilon)}{2\,\zeta((-8+\beta_1)\zeta\kappa+4\beta_2\zeta\mu+4\mu^2)-4\zeta((-4+\beta_1)\kappa+2\beta_2\mu)\upsilon+2\beta_1\kappa\upsilon^2} \quad (۲۴)$$

مقدار EAG حداقل سطح برنامه ریزی شده توسط دولت است.

۵- تحلیل‌های پارامتریک

در این بخش، خواص تعادل در رقابت استکلبرگ را با توجه به مقایسه سناریوها و تأثیر افزایش پارامترهای مهم بر توابع هدف مختلف مطالعه خواهد شد.

گزاره‌ی ۱-۵: اگر پارامتر ϵ_1 رابه صورت نشان داده شده در رابطه‌ی (۲۵) در نظر بگیریم، آن گاه نتایج جدول (۳) حاصل خواهد شد:

$$\epsilon_1 = \frac{\beta_2\kappa\big(2\,\alpha\mu + (4\,ETU\theta - (c_1 + c_2)\mu)(\zeta - \upsilon)\big)(\zeta - \upsilon)}{2\,\mu(-2\,\zeta\kappa + \beta_2\zeta\mu + \mu^2 + 2\,\kappa\upsilon - \beta_2\mu\upsilon)} \qquad (۲۵)$$

جدول (۳) شرایط گزاره‌ی ۳-۹

نتیجه	شرط
$s^*_{G2} < s^*_{G1}$ $t^*_{G2} > t^*_{G1}$ $w^*_{1(G2)} < w^*_{1(G1)}$ $w^*_{2(G2)} < w^*_{2(G1)}$ $p^*_{1(G2)} < p^*_{1(G1)}$ $p^*_{2(G2)} < p^*_{2(G1)}$ $e^*_{G2} < e^*_{G1}$	اگر و تنها اگر: $\beta_3 > \epsilon_1$
$s^*_{G2} < s^*_{G1}$ $t^*_{G2} < t^*_{G1}$ $w^*_{1(G2)} > w^*_{1(G1)}$ $w^*_{2(G2)} > w^*_{2(G1)}$ $p^*_{1(G2)} > p^*_{1(G1)}$ $p^*_{2(G2)} > p^*_{2(G1)}$ $e^*_{G2} > e^*_{G1}$	اگر و تنها اگر: $\beta_3 < \epsilon_1$

β_3 از جنس واحد پولی می‌باشد. امر مهمی که از این خاصیت پارامتریک مدل برداشت می‌شود این است که دولت در محاسبات خود، به چه میزان سطح سرمایه‌گذاری سبز اجرا شده توسط تولیدکننده را برای خود مهم می‌شمارد. اگر این میزان ارزش مالی، بیشتر از آستانه‌ی مشخص شده باشد، قیمت خرده فروش و تولیدکننده بهینه در سیاست نخست سبز دولت یعنی نسبت به زمانی که دولت متغیر سیاست دوم زیست محیطی یعنی را به اجرا می‌گذارد کمتر است. در نتیجه مجبور است برای تعدیل قیمت در سیاست دوم زیست محیطی، با افزایش یارانه‌ی خودروی الکتریکی به ثبات این کالا در بازار کمک کند. این درحالی است که در سیاست دوم زیست محیطی، مالیات خودروی بنزینی بیشتر است. در نتیجه، در این حالت دولت اعمال فشار بیشتری بر روی خوروی بنزینی و کمک مضاعفی برای توسعه‌ی خودروی الکتریکی اعمال می‌کند. با این حال، اگر β_3 بالاتر از آستانه ذکر شده تعیین شود، همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، تمام نتایج بالا معکوس خواهند شد. در نتیجه، ارزیابی β_3 در شرایط واقعی از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا می‌تواند تعیین کند که کدام سیاست فشار بیشتری بر مصرف کنندگان وارد می‌کند و کدام یک باعث رفتار حمایتی دولت‌ها می‌شود.

گزاره‌ی ۲-۵: اگر پارامتر ϵ_2 را آن گونه که در رابطه‌ی (۲۶) تعریف شده است، در نظر بگیریم:

$$\epsilon_2 = \frac{1}{2\theta^2(8\,\zeta\kappa - 3\mu^2 - 8\,\kappa\upsilon)}\Big(\kappa\Big(\theta\mu\big(-2\,\alpha + (c_1 + c_2)(\zeta - \upsilon)\big) + 8\,BFP(2\,\zeta\kappa - \mu^2 - 2\,\kappa\upsilon) + 8\,EAG(-2\,\zeta\kappa + \mu^2 + 2\,\kappa\upsilon)\Big)\Big) \qquad (۲۶)$$

آن‌گاه تابع سود تولیدکننده بهینه شده زمانی که سیاست مالی توسط دولت اجرا می‌شود (Πg_F)، با افزایش ETU بهبود می‌یابد اگر و فقط اگر $ETU > \epsilon_2$ باشد. این موضوع می‌تواند اثرات مخربی بر زنجیره تامین داشته باشد. در حالی که واحد تجارت آلایندگی به دلیل تشدید و بدتر شدن وضعیت تغییرات آب و هوایی افزایش یافته است، تولیدکننده ضمن افزایش سود، تولید محصول خود را ادامه خواهد داد. در نتیجه، ETU باید به اندازه کافی مقرون به صرفه نگه داشته شود.

گزاره‌ی ۳-۵: تابع سود بهینه تولیدکننده هنگامی که دومین سیاست زیست محیطی توسط دولت اجرا می‌شود با افزایش ETU بهبود می‌یابد در صورتی که شرایط نشان داده شده در رابطه‌ی (۲۷) اعمال شود:

$$\beta_3 > \frac{1}{2\,\theta\mu^2}\Big(2\,ETU\theta^2(-8\,\zeta\kappa + 3\mu^2 + 8\,\kappa\upsilon) + \kappa\left(\theta\mu\big(-2\,\alpha + (c_1+c_2)(\zeta-\upsilon)\big) + 8\,BFP(2\,\zeta\,\kappa - \mu^2 - 2\,\kappa\upsilon) + 8\,EAG(-2\,\zeta\kappa + \mu^2 + 2\,\kappa\upsilon)\right)\Big) \quad (۲۷)$$

با فرض این که دولت دومین سیاست سبز ($G2$) را اعمال کرده است، اگر β_3 به اندازه کافی بالا باشد، با افزایش ETU ، سود تولیدکننده افزایش می‌یابد. این می‌تواند بسیار مهم باشد زیرا افزایش ETU می‌تواند نشانه‌ای برای تشدید مسائل زیست محیطی باشد.

گزاره‌ی ۴-۵: دو آستانه ϵ_3 و ϵ_4 در روابط (۲۸) و (۲۹) تعریف می‌شوند:

$$\epsilon_3 = \frac{\kappa\big(-2\,\alpha + (c_1+c_2)(\zeta-\upsilon)\big)}{2\,\theta\mu} \quad (۲۸)$$

$$\epsilon_4 = \frac{\kappa\mu\big(-2\,\alpha + (c_1+c_2)(\zeta-\upsilon)\big)}{2\,\theta(4\,\zeta\kappa - \mu^2 - 4\,\kappa\upsilon)} \quad (۲۹)$$

تابع سود مالی بهینه دولت (Πg_F^*) با افزایش κ بهبود می‌یابد اگر و تنها در صورتی که یکی از روابط (۳۰) و (۳۱) برقرار باشد:

$$\left((\epsilon_3 < ETU < \epsilon_4) \text{ و } 2\,\alpha > (c_1+c_2)(\zeta-\upsilon)\right) \quad (۳۰)$$

$$\left((\epsilon_3 > ETU > \epsilon_4) \text{ و } 2\,\alpha > (c_1+c_2)(\zeta-\upsilon)\right) \quad (۳۱)$$

اگر فرض شود که دولت سیاست مالی را اعمال کرده است، با توجه به میزان مالیات دریافتی و یارانه ای که دولت می‌پردازد، دولت از افزایش مخارج سرمایه گذاری سبز منتفع می‌شود. این وضعیت نشان می‌دهد که بدون مشوق‌ها و تعهدات زیست محیطی، دولت انگیزه ای برای توسعه تحقیق و توسعه برای کاهش هزینه‌های فناوری سبز ندارد. این می‌تواند بر عدم تمایل تولیدکننده به گسترش سرمایه گذاری سبز تأثیر بگذارد.

گزاره‌ی ۵-۵: اگر آستانه‌های نشان داده شده در روابط (۳۲) و (۳۳) را در نظر بگیریم:

$$\epsilon_5 = \frac{\kappa\mu\big(-2\,\alpha + (c_1+c_2)(\zeta-\upsilon)\big)}{2\,\theta(4\,\zeta\kappa - \beta_2\zeta\mu - \mu^2 - 4\,\kappa\upsilon + \beta_2\mu\upsilon)} \quad (۳۲)$$

$$\epsilon_6 = \frac{\kappa\big(-2\,\alpha + (c_1+c_2)(\zeta-\upsilon)\big)}{2\,\theta\big(\mu + \beta_2(\zeta-\upsilon)\big)} \quad (۳۳)$$

تابع سود بهینه دولت هنگامی که سیاست سبز نخست اجرا می‌شود (Πg_{G1}^*) با افزایش κ بهبود می‌یابد اگر شرایط روابط (۳۴) و (۳۵) و یا این که شرایط روابط (۳۶) و (۳۷) برقرار باشد:

$$0 < \alpha < \frac{1}{2}(c_1+c_2)(\zeta-\upsilon) \quad (۳۴)$$

$$\epsilon_5 < ETU < \epsilon_6 \quad (۳۵)$$

$$2\,\alpha > (c_1+c_2)(\zeta-\upsilon) \quad (۳۶)$$

$$\epsilon_6 < ETU < \epsilon_5 \quad (۳۷)$$

اگر فرض شود که دولت اولین سیاست زیست محیطی (G1) را اعمال کرده است، دولت از افزایش مخارج سرمایه گذاری سبز سود می‌برد. این وضعیت می‌تواند شرایطی را مهیا کند که دولت علیرغم انگیزه‌های زیست محیطی و تعهدی که بر آن تمرکز دارد، انگیزه ای برای فراهم کردن توسعه تحقیق و توسعه برای کاهش هزینه‌های فناوری سبز توسط تولیدکننده نداشته باشد.

٦- نتایج عددی

تحلیل حساسیت در یک مثال عددی بررسی خواهد شد. توجه داشته باشید که فرض شده است که دولت اولین سیاست زیست محیطی خود را اجرا می‌کند. جدول (۴) مقادیر پیش فرض را نشان می‌دهد.

جدول (۴): مقادیر مفروض برای پارامترها در مثال عددی ارائه شده

پارامتر	مقدار عددی	واحد	پارامتر	مقدار عددی	واحد
α	۱۰۰۰۰۰۰	نفر	κ	۱۰	واحدپولی
ζ	۲۰	$\frac{\text{نفر}}{\text{واحدپولی}}$	BFP	۱۰۰۰۰	کیلوتن
υ	۰.۱	$\frac{\text{نفر}}{\text{پولی واحد}}$	θ	۱.۵	کیلوتن
μ	۲	نفر	EAG	۹۰۰۰	کیلوتن
c_1	۲۰۰۰۰	واحدپولی	β_1	۱	$\frac{\text{۱}}{\text{نفر}}$
c_2	۱۲۰۰۰	واحدپولی	β_2	۴	$\frac{\text{واحدپولی}}{\text{نفر}}$
ETU	۱۰۰۰۰	واحدپولی	β_3	۱۰۰۰	واحدپولی

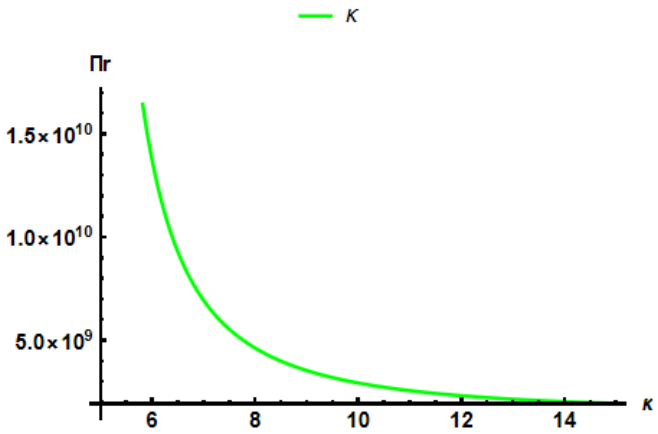
با فرض پارامترهای ذکر شده، متغیرهای مستقل و وابسته همانند جدول (۵) محاسبه می‌شود:

جدول (۵): مقادیر بهینه‌ی متغیرها در مثال عددی با پارامترهای مفروض در جدول (۴)

مقدار عددی	واحد	پارامتر	مقدار عددی	واحد	پارامتر
-----	۴۹۲۴	e	۴۴۱۸۱	واحدپولی	p_1
تعداد دستگاه خودرو	۱۶۰۳۰۳	D_1	۳۹۱۸۱	واحدپولی	p_2
تعداد دستگاه خودرو	۱۸۰۴۰۳	D_2	۳۶۱۲۱	واحدپولی	w_1
واحدپولی	۲۹۲۶۶۶۴۳۰۶	Π_R	۳۰۱۲۱	واحدپولی	w_2
واحدپولی	۵۷۹۵۹۵۳۱۹۹۹	Π_m	۲۵۰۴	واحدپولی	t
			۱۴۹۵	واحدپولی	s

همانگونه که مشاهده می‌شود، قیمت خرده فروشی خودروی الکتریکی بیشتر از خودروی بنزینی و تقاضای آن کمتر از خودروی بنزینی در این مثال بدست آمده است. تولیدکننده حدود دو برابر خرده فروش سود بدست می‌آورد و دولت متمایل به اعمال مالیات بیشتر به خودروی بنزینی نسبت به یارانه‌ی تخصیص یافته به هر خودروی الکتریکی است. با احتساب یارانه و مالیات برای هر دو خودرو، مشتری در بازار برای هر خودروی الکتریکی ۴۲۶۸۶ واحد پولی و برای خودروی بنزینی ۴۱۶۸۵ واحد پولی باید بپردازد. احتساب مالیات و یارانه باعث نزدیک شدن قیمت‌ها و تعدیل فاصله‌ی بین آن‌ها می‌شود.

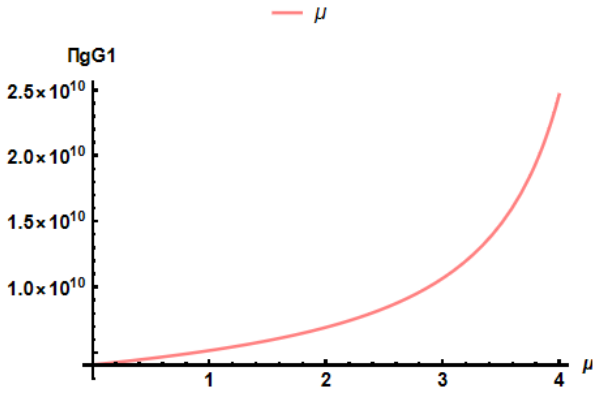
از آنجایی که تجزیه و تحلیل اثر افزایش یا کاهش هزینه‌ی سرمایه گذاری سبز بر تابع سود هر بازیکن مبهم است، روشن شدن آن از اهمیت بالایی برخوردار است. ابتدا، تأثیر افزایش هزینه سرمایه گذاری سبز برای دولت بر تابع سود خرده فروش در شکل(۲) نشان داده شد:



شکل(۲): تاثیر κ بر سود خرده‌فروش

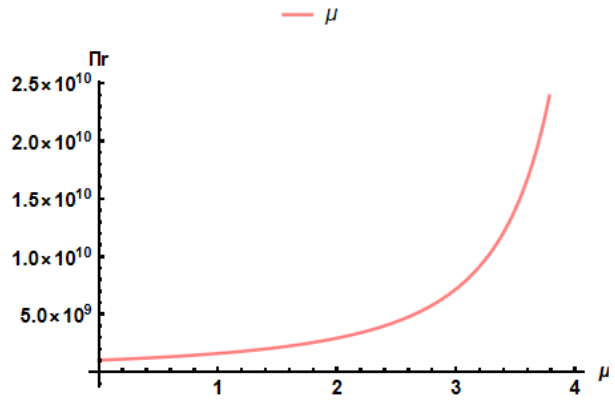
همانگونه که در شکل(۲) مشاهده می‌شود، با افزایش هزینه فناوری سبز، سود خرده فروش به شدت کاهش می‌یابد و سرعت کاهش سود خرده فروش در زمانی که فناوری سبز ارزان تر است، چشمگیرتر خواهد بود.

یکی دیگر از پارامترهای مهم که به آن پرداخته خواهد شد، تأثیر کشش یا الاستیسیته‌ی فناوری سبز در تقاضا بر تابع سود هر محصول است. ابتدا اثرات این پارامتر بر عملکرد سود دولت بررسی خواهد شد. این تحلیل با در نظر گرفتن این فرض که دولت اولین سیاست محیط‌زیستی را اجرا می‌کند، انجام خواهد شد. با اعمال این سیاست، اثر افزایش کشش فناوری سبز بر تقاضا بر تابع هدف درشکل(۳) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش این پارمتر بر سود دولت تأثیر مثبت می‌گذارد. شدت این اثر با افزایش این پارامتر افزایش می‌یابد.



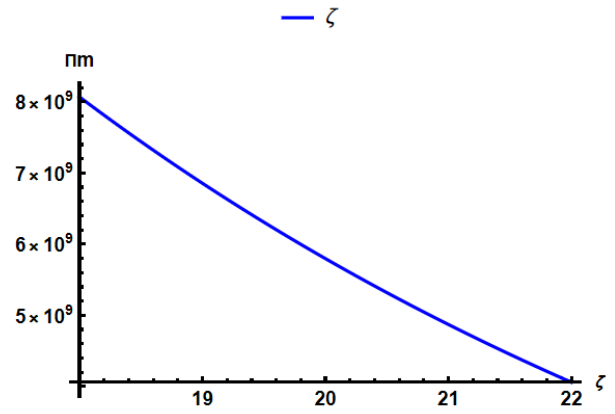
شکل(۳): تاثیر μ بر سود دولت

یک اثر مشابه نسبت به شکل قبلی در تحلیل قبلی که اثر μ بر تابع سود دولت در نظر گرفته شد، برای تابع سود خرده‌فروش مشاهده می‌شود. شکل (۴) نشان دهنده‌ی این اثر است.

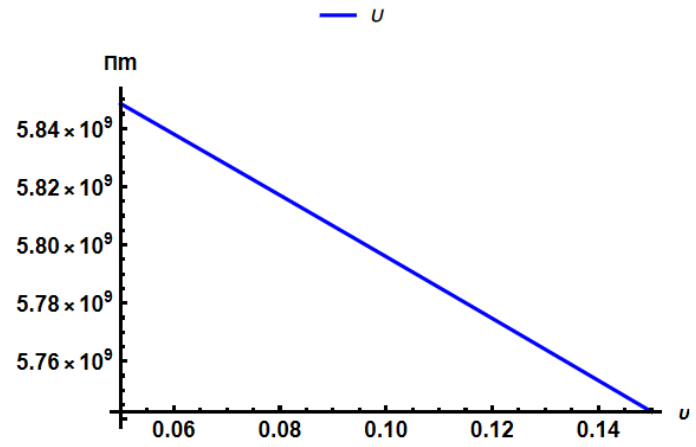


شکل (۴): اثر μ بر سود خرده‌فروش

شکل (۵) و شکل (۶) اثر پارامتر ζ و υ را بر سود تولیدکننده نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل‌ها نشان داده شده است، افزایش این پارامترها تاثیر منفی بر سود تولیدکننده دارد. این در حالی است هر دوی این ضریب‌ها برای یک کالا تاثیر مثبت در تقاضا و برای کالای دیگر تاثیر منفی دارد. در نتیجه در نگاه نخست تاثیر این پارامترها خنثی به نظر می‌رسد. در صورتی که این دو شکل نشان می‌دهند اینگونه نیست.



شکل (۵): تاثیر پارمتر ζ بر سود تولیدکننده



شکل (۶): تاثیر پارامترυ بر سود تولیدکننده

۷- نتیجه‌گیری

این پژوهش از یک رویکرد نظری بازی استکلبرگ برای بررسی زنجیره تامین خودروی الکتریکی و خودروی بنزینی متشکل از یک تولیدکننده و یک خرده‌فروش استفاده می‌کند. در این مطالعه، دولت به عنوان رهبر این زنجیره تامین در نظر گرفته شد. دولت برای

دستیابی به پنج هدف مختلف پایدار در حال اجرای سیاست کنترل و تجارت، مالیات و یارانه است. علاوه بر این، ردپای کربن به عنوان یک عامل مؤثر بر تقاضا بر اساس اهمیت بدتر شدن تغییرات آب و هوا برای مردم در نظر گرفته شد.

با توجه به اثبات شرایط تحدب در مدل ریاضی، در این پژوهش سعی شد تا تحلیل‌های مفید و کاربردی مناسبی بدست آورده شود که منجر به بینش‌های مدیریتی کاربردی می‌شود. در این پژوهش، آستانه‌هایی به دست آورده شدکه نقش محوری در تصمیمات بازیکنان دارد. به عنوان مثال، در مورد پیامدهای گسترده عدم تعهدات زیست محیطی دولت و همچنین پیامدهای تفاوت در دیدگاه زیست محیطی دولت بحث شد. با توجه به سیاست‌های دولت، قیمت‌های عمده و نهایی هر دو نوع خودرو تحلیل شد. علاوه بر آن، یک مثال عددی را تجزیه و تحلیل شد که در آن مقادیر واقع گرایانه‌ی پارامترها منجر به راه‌حل‌های بهینه واقعی می‌شوند.

با وجود نگرانی‌های در حال توسعه در مورد پایداری، شرکت‌ها و دولت‌ها به طور جدی تری اثرات زیست محیطی و اجتماعی کسب و کارها را در نظر می‌گیرند. این مقاله، مدل سازی واقع گرایلنه‌ای را ارائه می‌دهد که می‌تولند به عنوان یک مرجع مفید برای صنایع خودروسازی عمل کند و به آن‌ها کمک کند تا تجارت خود را به روشی چند بعدی توسعه دهند. تصمیم گیرندگان در بخش‌های فروش و بازاریابی، توسعه محصول، عملیات و ساخت و امور مالی می‌توانند از بینش مدیریتی این پژوهش استفاده کنند.

علاوه بر این، این مقاله چارچوبی را برای دولت‌ها فراهم می‌کند تا با اعمال فشار بر اعضای زنجیره تامین، از پیامدهای منفی زیست محیطی در تولید و ارائه‌ی محصولات خود جلوگیری کنند. مدیران عملیات لجستیک باید با مقامات دولتی تعامل داشته باشند تا تأثیرات بالقوه سیاست‌های دولت بر عملیات خود را بهتر درک کنند و از سیاست‌هایی حمایت کنند که از اهداف آنها حمایت می‌کند. جذابیت این مطالعه با کمک به کل زنجیره تامین برای بهبود هماهنگی بین یکدیگر و درک اهدافی که هر یک به طور همزمان متقاعد کننده است، افزایش می‌یابد.

یافته‌های این پژوهش به دلایل زیر به عنوان پاسخ‌های معتبر در نظر گرفته می‌شوند: ۱) شرایط تحدب در تحلیل پارامتری در نظر گرفته شد، ۲) در تحلیل عددی، مقادیر واقعی برای مدل در نظر گرفته شد و به پاسخ‌های واقع بینانه رسیده شد، ۳) پنج سیاست پایدار برای دولت در نظر گرفته شد که دغدغه‌های زیست محیطی، اجتماعی و مالی را برآورده می‌کند و ۴) در نهایت بسیاری از فاکتورهای تاثیرگذار در مدل عنوان متغیر و نه پارامتر در نظر گرفته شد تا روابط تعادلی در شرایط جامع‌تری مورد بررسی قرار گیرد.

این مقاله می‌تواند در جهات گوناگون توسعه یابد. عدم تقارن اطلاعات را می‌توان یک مسئله‌ی چالش برانگیز فرض کرد که سازندگان با آن مواجه خواهند شد. علاوه بر این، قیمت‌گذاری پویا در وسایل نقلیه در شرایطی که زنجیره تامین با مسئله‌ی آگاهی زیست‌محیطی مصرف کنندگان مواجه است، جذابیت خاصی را داراست. در نظر گرفتن تولیدکنندگان رقیب در مطالعات بعدی از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این، جنبه‌های اجتماعی پایداری، مانند شفافیت در این مدل، می‌تواند به عنوان انگیزه برای مطالعات بعدی مورد توجه قرار گیرد.

۸- اختصارات

در گزاره‌ی ۳-۴، $L1$ و $L2$, به شرح زیر هستند:

$$
\begin{aligned}
L1 = \zeta^2\mu\Big(& c_1\beta_1\zeta\kappa\mu + ETU(-8+\beta_1)\theta\big((-4+\beta_1)\zeta\kappa + 2\mu^2\big)\Big)\\
&- \zeta\Big(4c_1\beta_1\zeta^2\kappa^2 + ETU\,\theta\,\mu\big((32+(-16+\beta_1)\beta_1)\zeta\kappa - 2\beta_1\mu^2\big)\Big)\upsilon\\
&- \beta_1\zeta\kappa\big(ETU(4+\beta_1)\theta\mu + c_1(-8\,\zeta\kappa+\mu^2)\big)\upsilon^2 + \beta_1\kappa(-4\,c1\zeta\kappa + ETU\beta_1\theta\mu)\upsilon^3\\
&+ \alpha\kappa\big((-8+\beta_3)\zeta+\beta_3\upsilon\big)\big((-4+\beta_1)\zeta^2\kappa + \beta_1\kappa\upsilon^2 + 2\,\zeta(\mu^2 - (-2+\beta_1)\kappa\upsilon)\big)\\
&- c_2\kappa(\zeta-\upsilon)\Big((-8+\beta_3)(-4+\beta_1)\zeta^3\kappa + {\beta_1}^2\kappa\upsilon^3\\
&+ \zeta^2\big((-16+3\beta_1)\mu^2 - (-8+\beta_1)(-4+\beta_1)\kappa\upsilon\big) + \beta_1\zeta\upsilon(3\mu^2 - \beta_1\kappa\upsilon)\Big)
\end{aligned}
$$

$$L2 = (\zeta^2\mu(-c_2\beta_1\zeta\kappa\mu - ETU(-8+\beta_1)\theta((-4+\beta_1)\zeta\kappa + 2\mu^2)) + \zeta(4c_2\beta_1\zeta^2\kappa^2 + ETU\theta\mu((32 + (-16 + \beta_1)\beta_1)\zeta\kappa - 2\beta_1\mu^2))\upsilon + \beta_1\zeta\kappa(ETU(4+\beta_1)\theta\mu + c_2(-8\,\zeta\kappa + \mu^2))\upsilon^2 + \beta_1\kappa(4c_2\zeta\kappa - ETU\beta_3\theta\mu)\upsilon^3 - \alpha\kappa((-8+\beta_1)\zeta + \beta_1\upsilon)((-4+\beta_1)\zeta^2\kappa + \beta_1\kappa\upsilon^2 + 2\,\zeta(\mu^2 - (-2 + \beta_1)\kappa\upsilon))$$
$$+ c_1\kappa(\zeta - \upsilon)\Big((-8+\beta_1)(-4+\beta_1)\zeta^3\kappa + {\beta_1}^2\kappa\upsilon^3$$
$$+ \zeta^2\big((-16+3\beta_3)\mu^2 - (-8+\beta_1)(-4+\beta_1)\kappa\upsilon\big) + \beta_1\zeta\upsilon(3\mu^2 - \beta_1\kappa\upsilon)\Big)$$

۹- اثبات‌ها

اثبات گزاره‌ی ۱-۴در این گزاره، تلاش بر بیشینه‌سازی عبارت زیراست:

$$\Big(\big((p_1 - w_1)\times D_1\big)K + \big((p_2 - w_2)\times D_2\big) - (1-\phi)\,\epsilon_r(t)^2\Big)$$

برای به دست آوردن بهترین پاسخ‌های خرده فروش، شرایط مرتبه اول برابر با صفر قرار داده شد که سیستم معادلات زیر بدست آمد:

$$\begin{cases}\alpha + (-2p_1 + s + w_1)\,\zeta + e\,\mu + (2\,p_2 + t - w_2)\,\upsilon = 0\\ \alpha + (-2p_2 - t + w_2)\,\zeta + e\,\mu + (2\,p_1 - s - w_1)\,\upsilon = 0\end{cases}$$

با حل این دستگاه معادلاتی با توجه به متغیرهای خرده فروش، بهترین پاسخ‌ها بدست آمد.

گزاره‌ی **۲-۴**

در این گزاره سعی شده است عبارت زیر بیشینه شود:

$$(w_1 - c_1)\,D_1K - \kappa\frac{e^2}{2} + \Big(ETU\big(EAG - (BFP - \theta * e)\big)\Big) + (w_2 - c_2)\,D_2 - i_m(t) - \phi\,\epsilon_r(t)^2$$

برای به دست آوردن بهترین پاسخ‌های تولیدکننده، شرایط مرتبه اول برابر با صفر قرار داده می‌شود که سیستم معادلات زیر بدست می‌آید:

$$\begin{cases} ETU\,\theta - e\,\kappa + \frac{1}{2}(-c_1 - c_2 + w_1 + w_2)\,\mu = 0\\ \frac{1}{2}(\alpha + (c_1 + s - 2\,w_1)\,\zeta + e\,\mu + (-c_2 + t + 2\,w_2)\,\upsilon) = 0\\ \frac{1}{2}(\alpha + c2\,\zeta - (t + 2\,w_2)\,\zeta + e\,\mu - (c_1 + s - 2\,w_1)\,\upsilon) = 0\end{cases}$$

برای دستیابی به شرایط مقعر، ماتریس هسین تعریف می‌شود:

$$H = \begin{bmatrix} -\kappa & \frac{\mu}{2} & \frac{\mu}{2}\\ \frac{\mu}{2} & -\zeta & \upsilon\\ \frac{\mu}{2} & \upsilon & -\zeta\end{bmatrix}$$

برای اثبات بهینه بودن جهانی بهترین پاسخ تولیدکننده ، باید نشان داد که

$$|H_1| = -\kappa \le 0 \text{ و } |H_2| = \zeta\,\kappa - \frac{\mu^2}{4} \ge 0 \text{ و } |H_3| = -\zeta^2\kappa + \frac{\zeta\mu^2}{2} + \frac{\mu^2\upsilon}{2} + \kappa\upsilon^2 \le 0$$

اشتراک شرایط بالا گزاره‌ی زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\kappa > \frac{\mu^2}{2\,\zeta - 2\,\upsilon}$$

اثبات گزاره‌ی ۳-۴: برای به دست آوردن پاسخ‌های بهینه دولت در هنگام اجرای استراتژی مازاد مصرف کننده (CS) ، شرایط مرتبه اول برابر با صفر قرار داده شد که سیستم معادلاتی بدست آمد. با حل آن سیستم به راه حل‌های بهینه دست یافت. علاوه بر این، ماتریس هسین با همان شرطی که در بخش قبل پیاده سازی کردیم) که در آن

$|H_{2\,n-1}| \le 0, |H_{2\,n}| \ge 0$, n∈(۱ و ...و ۲ و۳ N)

و N تعداد متغیرهاست.

همچنین شرایط تقعر تولیدکننده در نظر گرفته شد. نتیجه نشان داد که شرایط تعقر برای استراتژی CS به این شرح است:

$$\left(\left(\kappa > \frac{\mu^2(\zeta+\upsilon)}{4(\zeta-\upsilon)\upsilon} \text{ و } \beta_1 < \frac{8\,\zeta}{\zeta+\upsilon}\right) \text{یا} \left(\beta_1 + \frac{4\,\zeta(-2\,\zeta\kappa+\mu^2+2\,\kappa\upsilon)}{\kappa(\zeta-\upsilon)^2} < 0 \text{ و } \frac{\mu^2}{2\,\zeta-2\,\upsilon} < \kappa \text{ و } \kappa \le \frac{\mu^2(\zeta+\upsilon)}{4(\zeta-\upsilon)\upsilon}\right)\right)$$

گزاره‌ی ۴-۴: برای به دست آوردن راه حل‌های بهینه دولت هنگام اجرای اولین استراتژی زیست‌محیطی(G1) ، شرایط مرتبه اول را برابر با صفر قرار داده شد که سیستم معادلاتی بدست آمد. با حل آن سیستم می‌توان به راه حل‌های بهینه دست یافت. علاوه بر این، ماتریس هسین را با همان شرطی که در بخش قبل پیاده سازی شد ، تعریف شد:

$|H_{2\,n-1}| \le 0, |H_{2\,n}| \ge 0$, n∈(۱ و ...و ۲ و۳ N)

N تعداد متغیرهاست. همچنین شرایط تقعر تولیدکننده در نظر گرفته شد. نتیجه نشان داد که شرایط تعقر برای استراتژی G1 به این شرح است:

$$\kappa > \frac{\mu^2}{2\,\zeta-2\,\upsilon} \text{ و } 0 < \beta_2 < \frac{2\,\zeta\kappa-\mu^2-2\,\kappa\upsilon}{\zeta\mu-\mu\upsilon}$$

اثبات گزاره‌ی ۵-۴: برای به دست آوردن راه حل‌های بهینه دولت هنگام اجرای دومین استراتژی زیست‌محیطی(G2) ، شرایط مرتبه اول برابر با صفر قرار داده شد که سیستم معادلاتی بدست آمد. با حل آن سیستم می‌توان به راه حل‌های بهینه دست یافت. علاوه بر این، ماتریس هسین را با همان شرطی که در بخش قبل پیاده سازی شد ، تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \frac{1}{8(2\,\zeta\kappa-\mu^2-2\,\kappa\upsilon)}(\zeta Aa + Ab\,\upsilon - 4(c1-2\,s)\kappa\upsilon^2) = 0 \\ \frac{1}{8(2\,\zeta\kappa-\mu^2-2\,\kappa\upsilon)}(\zeta\,Ac + Ad\,\upsilon + 4(c_2+2\,t)\kappa\upsilon^2) = 0 \end{cases}$$

که در آن

$$\text{Aa} = 4\,\alpha\kappa - 4(c_2+2\,t)\zeta\kappa - 4(\beta_3 - ETU\theta)\mu + \left(-c_1+c_2+2(s+t)\right)\mu^2$$

$$\text{Ab} = -4\,\alpha\kappa + 4(c_1+c_2-2\,s+2\,t)\zeta\kappa + 4(\beta_3 - ETU\theta)\mu + \left(-c_1+c_2+2(s+t)\right)\mu^2$$

$$\text{Ac} = -4\,\alpha\kappa + 4(c_1-2\,s)\zeta\kappa + 4(\beta_3 - \text{ETU}\theta)\mu + \left(-c_1+c_2+2(s+t)\right)\mu^2$$

$$\text{Ad} = 4\,\alpha\kappa - 4(c_1+c_2-2\,s+2\,t)\zeta\kappa - 4(\beta_3 - \text{ETU}\theta)\mu + \left(-c_1+c_2+2(s+t)\right)\mu^2$$

$|H_{2\,n-1}| \le 0, |H_{2\,n}| \ge 0$, n∈(۱ و ...و ۲و۳ N)

همچنین شرایط تقعر برای تولیدکننده در نظر گرفته شد. نتیجه نشان داد که شرایط تقعر برای استراتژی $G2$ به این شرح است

$$\kappa > \frac{\mu^2}{2\,\zeta-2\,\upsilon}$$

گزاره‌ی ۶-۴: برای به دست آوردن بهترین پاسخ‌های دولت هنگام اجرای سیاست مالی(F) ، شرایط مرتبه اول را برابر با صفر قرار می‌دهیم که سیستم معادلات زیر بدست می‌آید:

$$\begin{cases} \left(\left(\begin{matrix}\zeta\, Ae + \\ \left(-4\,\alpha\kappa + 4(c_1 + c_2 - 2\,s + 2\,t)\zeta\kappa - 4\,\mathrm{ETU}\,\theta\mu + \left(-c_1 + c_2 + 2(s+t)\right)\mu^2\right)\upsilon - 4(c_1 - 2\,s)\kappa\upsilon^2\end{matrix}\right)\right) \\ \times \dfrac{1}{8(2\,\zeta\kappa - \mu^2 - 2\,\kappa\upsilon)} = 0 \\ \left(\begin{matrix}\zeta\, Af + \\ \left(4\,\alpha\kappa - 4(c_1 + c_2 - 2\,s + 2\,t)\zeta\kappa + 4\,\mathrm{ETU}\,\theta\mu + \left(-c_1 + c_2 + 2(s+t)\right)\mu^2\right)\upsilon + 4(c_2 + 2\,t)\kappa\upsilon^2\end{matrix}\right) \times \\ \dfrac{1}{8(2\,\zeta\kappa - \mu^2 - 2\,\kappa\upsilon)} = 0 \end{cases}$$

که در آن:

$$Ae = \left(4\,\alpha\kappa - 4(c_2 + 2\,t)\zeta\kappa + 4\,ETU\theta\mu + \left(-c_1 + c_2 + 2(s+t)\right)\mu^2\right)$$

$$Af = \left(-4\,\alpha\kappa + 4(c_1 - 2\,s)\zeta\kappa - 4\,\mathrm{ETU}\,\theta\mu + \left(-c_1 + c_2 + 2(s+t)\right)\mu^2\right)$$

علاوه بر این، ماتریس هسین را با همان شرطی که در بخش قبل پیاده سازی شد ، تعریف شد:

$|H_{2\,n-1}| \le 0, |H_{2\,n}| \ge 0$, n∈(۱ و ...و ۲ و ۳ و N)

N تعداد متغیرهاست

همچنین شرایط تقعر تولیدکننده در نظر گرفته شد. نتیجه نشان داد که شرایط تعقر برای استراتژی F به این شرح است:

$\kappa > \frac{\mu^2}{2\,\zeta - 2\,\upsilon}$ گزاره‌ی ۷-۴: برای به دست آوردن راه حل‌های بهینه دولت هنگام اجرای سیاست ترکیبی (C)، شرایط مرتبه اول برابر با صفر قرار داده شد که سیستم معادلاتی بدست آمد. با حل آن سیستم می‌توان به راه حل‌های بهینه دست یافت. علاوه بر این، ماتریس هسین را با همان شرطی که در بخش قبل پیاده سازی شد ، تعریف شد:

$|H_{2\,n-1}| \le 0, |H_{2\,n}| \ge 0$, $n \in (1$ و 2 و 3 و ... و $N)$

N تعداد متغیرهاست

همچنین شرایط تقعر تولیدکننده در نظر گرفته شد. نتیجه نشان داد که شرایط تقعر برای استراتژی C عبارت است از:

$$0 < \beta_2 < \frac{\mu}{-\zeta + \upsilon} + \frac{\kappa\left(8 + \beta_1\left(-1 + \frac{\upsilon}{\zeta}\right)\right)}{4\,\mu} \text{ و } \beta_1 > 0 \text{ و } \left(\left(\kappa > \frac{\mu^2(\zeta+\upsilon)}{4(\zeta-\upsilon)\upsilon} \text{ و } \beta_1 < \frac{8\,\zeta}{\zeta+\upsilon}\right) \text{ یا } \left(\beta_1 + \frac{4\,\zeta\left(-2\,\zeta\kappa + \mu^2 + 2\,\kappa\upsilon\right)}{\kappa(\zeta-\upsilon)^2} < \right.\right.$$

$$\left.\left. 0 \text{ و } \frac{\mu^2}{2\,\zeta - 2\,\upsilon} < \kappa \text{ و } \kappa \le \frac{\mu^2(\zeta+\upsilon)}{4(\zeta-\upsilon)\upsilon}\right)\right)$$

اثبات گزاره‌ی ۱-۵: در نظر گرفتن تحدب برای هر دو استراتژی محیطیG1 و G2 کمک می‌کند تا روابط ذکر شده نشان داده شود.

گزاره‌ی ۲-۵: با در نظر گرفتن تحدب برای تابع سـود مالی (F) و همچنین تابع سـود تولیدکننده با توجه به پارامتر ETU زمانی که پاسخ‌های بهینه دولت در شرایطی که استراتژی مالی توسط دولت اتخاذ می‌شود می‌توان روابط مذکور را نشان داد.گزاره‌ی ۳-۵: در نظر گرفتن تحدب برای تابع سـود مالی (F) و همچنین اسـتنتاج تابع سـود تولیدکننده با توجه به پارامتر κ در زمانی که پاسـخ‌های بهینه دولت در شرایطی که استراتژی مالی توسط دولت اتخاذ می‌شود می‌توان روابط مذکور را نشان داد.

گزاره‌ی ۴-۵: در نظر گرفتن تحدب برای تابع سود مالی (F) و همچنین استنتاج تابع سود دولت با توجه به پارامتر κ زمانی که پاسخ‌های بهینه دولت در شرایطی که استراتژی مالی توسط دولت اتخاذ می‌شود می‌توان روابط مذکور را نشان داد.

مراجع

[1] M. Gao, C. Liu, Z. Liu, and X. Chen, "A tabu search algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with varied carbon emission constraints in different time intervals," *Journal of the Operational Research Society*, pp. 1-15, 2023, doi: 10.1080/01605682.2023.2233555.

[2] C. Lee, "An exact algorithm for the electric-vehicle routing problem with nonlinear charging time," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 72, no. 7, pp. 1461-1485, 2021, doi: 10.48550/arXiv.2108.01273.

[3] K. Valogianni, W. Ketter, J. Collins, and D. Zhdanov, "Sustainable electric vehicle charging using adaptive pricing," *Production and Operations Management*, vol. 29, no. 6, pp. 1550-1572, 2020, doi:10.1111/poms.13179

[4] Z. Wu and H. Liao, "An approach to hesitant fuzzy linguistic multiple criteria group decision making with uncertain criteria weights considering incomparability between alternatives," *Journal of the Operational Research Society*, pp. 1-13, 2023, doi: 10.1080/01605682.2023.2172365.

[5] S. Hasan, "Assessment of electric vehicle repurchase intention: A survey-based study on the Norwegian EV market," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 11, p. 100439, 2021, doi:10.1016/j.trip.2021.100439

[6] M. Rasti-Barzoki and I. Moon, "A game theoretic approach for analyzing electric and gasoline-based vehicles' competition in a supply chain under government sustainable strategies: A case study of South Korea," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 146, p. 111139, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111139.

[7] M. Chen and Y. Gong, "Sustaining and sharing: Optimal decisions in product-sharing platforms with green services," *Journal of the Operational Research Society*, pp. 1-15, 2023.

[8] M. Shafiee and M. Honarvar, "Studying the effect of carbon tax policy on a dual-channel supply chain for deteriorating products," *Journal of the Operational Research Society*, pp. 1-18, 2023, doi: 10.1080/01605682.2023.2209110.

[9] X. Chen, Y. Wu, A. Ji, and X. Xu, "Offering subsidies to logistics providers and consignors," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 72, no. 1, pp. 35-60, 2021, doi: 10.1080/01605682.2019.1650622.

[10] J. Bai, S. Hu, L. Gui, K. C. So, and Z. J. Ma, "Optimal subsidy schemes and budget allocations for government-subsidized trade-in programs," *Production and Operations Management*, vol. 30, no. 8, pp. 2689-2706, 2021, doi: 10.1111/poms.13401.

[11] J. J. Yu, C. S. Tang, M. K. Li, and Z. J. M. Shen, "Coordinating installation of electric vehicle charging stations between governments and automakers," *Production and Operations Management*, vol. 31, no. 2, pp. 681-696, 2022, doi: 10.1111/poms.13564.

[12] M. Zhu, Z. Liu, J. Li, and S. X. Zhu, "Electric vehicle battery capacity allocation and recycling with downstream competition," *European Journal of Operational Research*, vol. 283, no. 1, pp. 365-379, 2020, doi: 10.1016/j.ejor.2019.10.040.

[13] Z. Tian, X. Gao, S. Su, J. Qiu, X. Du, and M. Guizani, "Evaluating reputation management schemes of internet of vehicles based on evolutionary game theory," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 6, pp. 5971-5980, 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2910217.

[14] Y. Fang et al., "Improving solar power usage with electric vehicles: Analyzing a public-private partnership cooperation scheme based on evolutionary game theory," *Journal of Cleaner Production*, vol. 233, pp. 1284-1297, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.001.

[15] Laha, B. Yin, Y. Cheng, L. X. Cai, and Y. Wang, "Game theory based charging solution for networked electric vehicles: A location-aware approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 7, pp. 6352-6364, 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2916475.

[16] Y. Hu, Z. Wang, and X. Li, "Impact of policies on electric vehicle diffusion: An evolutionary game of small world network analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 265, p. 121703, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121703.
[17] Y. Yu, G. Li, and Z. Li, "A game theoretical pricing mechanism for multi-microgrid energy trading considering electric vehicles uncertainty," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 156519-156529, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019815.
[18] L. Zhu et al., "A game-theory analysis of electric vehicle adoption in Beijing under license plate control policy," *Energy*, vol. 244, p. 122628, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122628.
[19] Chakraborty, R. R. Kumar, and K. Bhaskar, "A game-theoretic approach for electric vehicle adoption and policy decisions under different market structures," Journal of the Operational Research Society, vol. 72, no. 3, pp. 594-611, 2021, doi: 10.1080/01605682.2019.1678407.
[20] S. Woo, S. Bae, and S. J. Moura, "Pareto optimality in cost and service quality for an Electric Vehicle charging facility," *Applied Energy*, vol. 290, p. 116779, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116779.
[21] Z. Zhao, L. Zhang, M. Yang, J. Chai, and S. Li, "Pricing for private charging pile sharing considering EV consumers based on non-cooperative game model," *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, p. 120039, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120039.
[22] Y. Yu, D. Zhou, D. Zha, and Q. Wang, "Joint optimization of charging facility investment and pricing in automobile retail supply chain and coordination," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 156, p. 107296, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107296.
[23] H. Wang, T. Zheng, W. Sun, and M. Q. Khan, "Research on the pricing strategy of park electric vehicle agent considering carbon trading," *Applied Energy*, vol. 340, p. 121017, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121017.
[24] K. Li and L. Wang, "Optimal electric vehicle subsidy and pricing decisions with consideration of EV anxiety and EV preference in green and non-green consumers," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 170, p. 103010, 2023, doi: 10.1016/j.tre.2022.103010.
[25] Z. L. Liu, T. D. Anderson, and J. M. Cruz, "Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chains," *European Journal of Operational Research*, vol. 218, no. 3, pp. 602–613, 2012, doi: 10.1016/j.ejor.2011.11.027.
[26] S. Song, K. Govindan, L. Xu, P. Du, and X. Qiao, "Capacity and production planning with carbon emission constraints," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 97, pp. 132–150, 2017, doi: 10.1016/j.tre.2016.10.007.
[27] Z. Hong and X. Guo, "Green product supply chain contracts considering environmental responsibilities," *Omega*, vol. 83, pp. 155–166, 2019, doi: 10.1016/j.omega.2018.02.010.
[28] H. Gilani, H. Sahebi, and F. Oliveira, "Sustainable sugarcane-to-bioethanol supply chain network design: A robust possibilistic programming model," *Applied Energy*, vol. 278, p. 115653, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115653.
[29] D. C. H. Lee and P. B. Lee, "The implications of electric vehicle policies on the environment," *Environmental Economics and Policy Studies*, vol. 14, pp. 91–107, 2012, doi: 10.1007/s10018-011-0032-9.
[30] H. Feng, Y. Zeng, X. Cai, Q. Qian, and Y. Zhou, "Altruistic profit allocation rules for joint replenishment with carbon cap-and-trade policy," *European Journal of Operational Research*, vol. 290, no. 3, pp. 956–967, 2021, doi: 10.1016/j.ejor.2020.08.040.
[31] R. Tang and L. Yang, "Impacts of financing mechanism and power structure on supply chains under cap-and-trade regulation," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 139, p. 101957, 2020, doi: 10.1016/j.tre.2020.101957.
[32] S. Rhein and M. Schmid, "Consumers' awareness of plastic packaging: More than just environmental concerns," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 162, p. 105063, 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105063.

[33] L. W. Saunders, J. P. Brooks, J. R. Merrick, and C. W. Autry, "Addressing economic/environmental sustainability trade-offs in procurement episodes with industrial suppliers," *Production and Operations Management*, vol. 29, no. 5, pp. 1256–1269, 2020, doi: 10.1111/poms.13162.

[34] P. Kennedy, S. P. Sethi, C. C. Siu, and S. C. P. Yam, "Cooperative advertising in a dynamic three-echelon supply chain," *Production and Operations Management*, vol. 30, no. 11, pp. 3881–3905, 2021, doi: 10.1111/poms.13487.

[35] J. Xia and W. Niu, "Carbon-reducing contract design for a supply chain with environmental responsibility under asymmetric information," *Omega*, vol. 102, p. 102390, 2021, doi: 10.1016/j.omega.2020.102390.

[36] H. Jahangir, et al., "Charging demand of plug-in electric vehicles: Forecasting travel behavior based on a novel rough artificial neural network approach," *Journal of Cleaner Production*, vol. 229, pp. 1029–1044, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.345.

زیرنویس‌ها

[1] https://www.cleanenergyministerial.org/initiatives-campaigns/ev3030-campaign/
[2] "old-for-new"
[3] Small World
[4] Customer surplus
[5] Tax Optimization (TO-strategy)
[6] Subsidy Optimization (SO-strategy)
[7] Pareto optimality
[8] Stationary Demand Management and Mobile Demand management
[9] logit
[10] carbon peaking and carbon neutralization
[11] EV anxiety
[12] Robust
[13] ETU
[14] Consumer surplus