

رویکرد نظریه بازی برای مدل‌سازی رقابت در بازار حمل و نقل جاده‌ای و ریلی کالا

مقاله پژوهشی

محمد تمنایی*، استادیار، دانشکده مهندسی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی اصفهان
مرتضی راستی برزکی، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه صنعتی اصفهان

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.tamannaei@cc.iut.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۸/۲۷ - پذیرش: ۹۸/۰۲/۰۴

صفحه ۱-۲۰

چکیده

در پژوهش حاضر، مسئله رقابت در بازار حمل و نقل کالا بین طریقه‌های حمل جاده‌ای (کامیون) و ترکیبی (کامیون-قطار) با استفاده از رویکرد نظریه بازی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بسته به شرایط زیر ساخت ریلی و قابلیت اطمینان زمانبندی قطارها، دو سناریو (وجود سیستم‌های ریلی منعطف و غیرمنعطف) طراحی و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ساختار بازی در سناریوی اول، مبتنی بر تعادل نش است؛ در حالی که سناریوی دوم دارای ساختار بازی استکلبرگ (رهبر-پیرو) می‌باشد. قیمت‌های حمل و نقل طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی و زمان سفر طریقه حمل ترکیبی به عنوان متغیرهای تصمیم مسئله در نظر گرفته شده‌اند. برای هر یک از سناریوها، بازار رقابت حمل و نقل کالا مدل‌سازی شده و تأثیر سیاست‌های مختلف فنی و اقتصادی بر این بازار مورد تحلیل قرار گرفته است. بررسی سیاست افزایش قیمت سوخت نشان می‌دهد با اعمال این سیاست، زمان سفر طریقه حمل ترکیبی و تقاضا و سود طریقه حمل جاده‌ای کاهش می‌یابد. سیاست کاهش هزینه‌های تخلیه و بارگیری کالا در ایستگاه‌های ریلی در طریقه حمل ترکیبی سبب کاهش قیمت تعادلی هر دو طریقه‌ی حمل جاده‌ای و ترکیبی و کاهش تقاضا و سود طریقه حمل جاده‌ای می‌شود. سیاست کاهش ضریب هزینه‌ی سرمایه‌گذاری جهت بهبود زمان سفر طریقه حمل ترکیبی، افزایش تقاضای طریقه حمل ترکیبی و کاهش تقاضا و سود طریقه حمل جاده‌ای را در پی خواهد داشت. سیاست استفاده از کامیون‌های مدرن با مصرف سوخت پایین در حمل و نقل جاده‌ای، سبب کاهش قیمت تعادلی هر دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی، کاهش تقاضا و سود طریقه حمل ترکیبی و افزایش زمان سفر تعادلی طریقه حمل ترکیبی می‌شود. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به عنوان ابزاری جهت سیاست‌گذاری بازار رقابتی حمل و نقل کالا، مورد استفاده مدیران و سیاست‌گذاران حمل و نقل و نیز شرکت‌های فراهم‌آورنده خدمات حمل و نقل جاده‌ای و ریلی کالا قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: حمل و نقل کالا، قیمت‌گذاری، نظریه بازی، سیاست‌گذاری حمل و نقل، سیستم‌های جاده‌ای و ریلی، زمان سفر

۱- مقدمه

در طریقه جاده‌ای، یا با استفاده از بیش از یک نوع وسیله نقلیه صورت پذیرد (همچون طریقه ترکیبی کالا توسط کامیون و قطار) (Reis, 2013). وجود بیش از یک طریقه جهت حمل و نقل کالا از مبدأ به مقصد، می‌تواند سبب ایجاد بازار رقابت حمل و نقل کالا شود. شرکت‌های فعال در حوزه تولید، توزیع و زنجیره تأمین انواع کالاها، بدون فراهم‌آوری خدمات مطلوب حمل و نقل همچون قیمت مناسب حمل و زمان منطقی حمل

حمل و نقل، به عنوان یکی از عوامل اصلی پویایی اقتصادی، نقش مهمی در زنجیره تأمین کالا و خدمات ایفا می‌نماید. ارتقای کارایی سیستم حمل و نقل، به عنوان گامی کلیدی در جهت اقتصادی و رقابت‌پذیر نمودن زنجیره تأمین کالا از اهمیت بالایی برخوردار است. حمل و نقل کالا از مبدأ به مقصد، می‌تواند به طور کامل با استفاده از یک نوع وسیله نقلیه انجام شود (همچون حمل کالا توسط کامیون از مبدأ تا مقصد

قرار داده شده است. بر اساس نتایج پژوهش، یارانه دولتی جهت احداث زیرساخت‌های حمل و نقل بیشترین مطلوبیت را برای شرکت‌های لجستیک دارد.

در پژوهش (Feng et al., 2016)، قیمت‌گذاری حمل و نقل ریلی کالا با لحاظ همزمان سیاست‌های زیست‌محیطی دولت و سیاست افزایش درآمد شرکت‌های حمل و نقل ریلی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل پیشنهادی، با هدف ارتقای کارایی سیستم حمل و نقل کالا و راهنمایی مشتریان دوستدار حفظ محیط زیست حاصل گردیده است.

در مطالعه (Guo et al., 2016)، مکانیزم‌های همکاری بین شرکت‌های حمل و نقل جاده‌ای و ریلی کالا همچون بهبود فرآیندهای تخلیه و بارگیری، طراحی استراتژی‌های کنترل کیفیت خدمات، برنامه‌های تسهیم درآمد و سرمایه‌گذاری مشترک احداث تسهیلات ارزیابی شده‌اند. (Bask, et al., 2017) نقش پایداری زیست‌محیطی در انتخاب طریقه حمل و نقل کالا در اتحادیه اروپا را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش، پایداری در حمل و نقل کالا هم از دیدگاه فراهم‌آوردندگان خدمات لجستیک و هم از دید مشتریان ارزیابی گردیده است. در پژوهش حاضر، مسئله رقابت در بازار حمل و نقل کالا بین طریقه‌های حمل جاده‌ای (کامیون) و ترکیبی (کامیون-قطار-کامیون) با استفاده از نظریه بازی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۲، مسئله مورد بررسی پژوهش تعریف و توضیح داده شده است. در بخش ۳ بر مبنای دو سناریوی انعطاف‌پذیری سیستم ریلی، بازار رقابت حمل و نقل کالا مدل‌سازی گردیده است. مقادیر تعادلی متغیرهای مسئله در هریک از طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی در بخش ۴ محاسبه گردیده‌اند. در بخش ۵ تأثیر سیاست‌های مختلف فنی و اقتصادی بر بازار رقابتی حمل و نقل کالا مورد تحلیل قرار گرفته است. در انتها جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

نمادهای مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۱ معرفی می‌گردند. مسئله مورد بررسی در پژوهش حاضر بدین شرح می‌باشد: تناژ مشخصی از کالا (Q) بایستی از یک مبدأ تا یک مقصد مشخص جابجا گردد. بدین منظور، دو طریقه مختلف حمل و نقل کالا در دسترس هستند: حمل و نقل جاده‌ای (طریقه حمل جاده‌ای) و حمل و نقل ترکیبی (طریقه حمل ترکیبی). در طریقه حمل جاده‌ای، کالا در نقطه‌ی مبدأ، داخل

و نقل کالا، قادر به ادامه رقابت اقتصادی با طریقه‌های مختلف موجود در بازار حمل و نقل کالا نیستند (Shams et al., 2017).

رقابت در بازار حمل و نقل، علاوه بر جنبه‌ی کاهش هزینه‌های مالی و زمانی، از حیث پایداری زیست‌محیطی نیز واجد اهمیت است (Tamannaeci, et al., 2019). صنعت حمل و نقل مصرف‌کننده‌ی بخش عظیمی از انرژی و سوخت‌های فسیلی است و به عنوان یکی از منابع اصلی تولید گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط زیست محسوب می‌شود (Chen et al., 2017). سیستم‌های مختلف حمل و نقل کالا به ویژه دو سیستم جاده‌ای و ریلی سهم‌های متفاوتی در میزان آلودگی ناشی از حمل و نقل دارند. سیستم حمل و نقل ریلی به عنوان «حمل و نقل سبز» تولید آلودگی کمتری نسبت به سیستم حمل و نقل جاده‌ای کالا دارد و افزایش سهم آن در بازار رقابتی کالا می‌تواند به عنوان راهکاری جهت صرفه‌جویی در انرژی، کاهش تراکم ترافیکی جاده‌ها و کاهش آلودگی زیست محیطی عمل نماید (Cichenski et al., 2017; Khosravi et al., 2017). با این حال، جنبه‌های زیست-محیطی معمولاً جزو متغیرهای مدنظر مشتریان خدمات حمل و نقل جهت انتخاب طریقه حمل کالا به حساب نمی‌آیند و سیستم‌های حمل و نقل سبز (همچون راه‌آهن) برای بقا در بازار رقابتی حمل و نقل کالا بایستی بر متغیرهای مورد توجه مشتریان (همچون قیمت و زمان) توجه ویژه داشته باشند. مطالعات مختلفی در حوزه حمل و نقل کالا و طریقه‌های مختلف جاده‌ای، ریلی و ترکیبی مورد استفاده انجام شده است. مروری ساختارمند بر ادبیات موضوع حمل و نقل ترکیبی (StadieSeifi et al., 2014) ارائه شده است. در کالا توسط این پژوهش، مسائل بررسی‌شده در این حوزه، در سه سطح استراتژیک، تاکتیکال و عملیاتی تقسیم‌بندی شده‌اند.

در پژوهش (Beuthe et al., 2000)، بازار حمل و نقل کالا برای گونه‌های جاده‌ای و ریلی و دریایی با استفاده از تحلیل کشسانی تقاضا و شبکه حمل و نقل ترکیبی بلژیک مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش (Jiang et al., 2015) استراتژی‌های دولت در اعطای یارانه به طریقه‌های مختلف سیستم حمل و نقل ترکیبی و بهره‌وری یارانه‌های دولتی به شرکت‌های فراهم‌آورنده خدمات حمل و نقل ترکیبی را با استفاده از نظریه بازی‌ها تحت بازی استکلبرگ مورد بررسی

λ_i	ضریب هزینه سرمایه‌گذاری جهت بهبود (کاهش) یک واحد زمان سفر در طریقه حمل ترکیبی
f	قیمت یک لیتر سوخت
t_R	زمان سفر از مبدأ تا مقصد در طریقه حمل جاده‌ای
\bar{t}_M	کران بالای زمان سفر از مبدأ تا مقصد در طریقه حمل ترکیبی
\bar{c}_i	مجموع کل هزینه‌ها غیر از هزینه سوخت، برای حمل یک واحد تقاضا از مبدأ به مقصد در طریقه حمل i
p_i	قیمت حمل و نقل برای حمل یک واحد تقاضا از مبدأ به مقصد در طریقه حمل i (متغیر تصمیم)
t_M	زمان سفر از مبدأ تا مقصد در طریقه حمل ترکیبی (متغیر تصمیم)
q_i	تابع تقاضای حمل و نقل طریقه حمل i
π_i	تابع سود طریقه حمل i
SC_1	سناریوی ۱ (سیستم ریلی منعطف)
SC_2	سناریوی ۲ (سیستم ریلی غیرمنعطف)

هریک از این شرکت‌ها وظیفه هماهنگی و فراهم‌آوری خدمات حمل و نقل از نقطه‌ی مبدأ تا نقطه مقصد را بر عهده دارند. از طرف دیگر، صاحبان کالا (به عنوان مشتریان خدمات حمل و نقل) در انتخاب هر یک از دو طریقه‌ی حمل و نقل (جاده‌ای و ترکیبی) جهت جابجایی کالاهای خود اختیار کامل دارند. تصمیم صاحبان کالا، تابعی از مقادیر مختلفی از جمله قیمت حمل و نقل و نیز زمان سفر کالا از مبدأ تا مقصد می‌باشد (Kanafani, 1983; Kim et al., 2017; Pace and Ricci, 2018). در نتیجه، یک بازار رقابتی بین شرکت‌های لجستیک فراهم‌آورنده خدمات حمل و نقل جاده‌ای (طریقه حمل جاده‌ای) و ترکیبی (طریقه حمل ترکیبی) به وجود می‌آید؛ به نحوی که هر یک از دو رقیب، سعی در بکارگیری راهکارهایی جهت جذب سهم بیشتری از بازار حمل و نقل و افزایش سود خود دارند. به عبارت دیگر، دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی، در یک بازار حمل و نقل رقابتی قابل جایگزینی هستند. در شکل ۱، دو طریقه حمل و نقل رقیب -مورد مطالعه در پژوهش حاضر- نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که سیستم حمل و نقل ریلی، به دلیل آلاینده‌گی و مصرف سوخت کمتر و ایمنی بیشتر (نسبت به سیستم حمل و نقل جاده‌ای)، به عنوان «حمل و نقل سبز» شناخته می‌شود و از قابلیت بالایی در صرفه‌جویی مصرف انرژی و کاهش مخاطرات

وسيله نقلیه (کامیون) بارگیری می‌شود و پس از عبور از زیرساخت جاده‌ای مابین مبدأ و مقصد (مسافت D_R)، در نقطه‌ی مقصد به مشتری مربوطه تحویل می‌گردد. در طریقه حمل ترکیبی، از هر دو زیرساخت ریلی و جاده‌ای به صورت ترکیبی استفاده می‌شود؛ بدین صورت که ابتدا کالا در مبدأ توسط کامیون بارگیری می‌شود و با عبور از زیرساخت جاده‌ای، به ایستگاه راه‌آهن نزدیک به مبدأ انتقال داده می‌شود. در این ایستگاه، عملیات تخلیه (از کامیون) و بارگیری (در واگن - های باری قطار) انجام می‌گیرد. در ادامه، کالا توسط سیستم ریلی از ایستگاه راه‌آهن نزدیک به مبدأ تا ایستگاه راه‌آهن نزدیک به مقصد جابجا می‌گردد. سپس کالا با تخلیه (از واگن - های قطار) و بارگیری مجدد (در کامیون) و عبور از زیرساخت جاده‌ای به نقطه‌ی مقصد تحویل داده می‌شود. کل مسافت بین مبدأ و مقصد از طریقه حمل ترکیبی برابر با مسافت D_M است که d درصد آن به صورت جاده‌ای و مابقی به صورت ریلی می‌باشد ($0 \leq d < 1$). هر یک از دو طریقه حمل مذکور، به طور مجزا توسط شرکت‌های لجستیک (باربری) مدیریت می‌شوند.

جدول ۱. نمادهای مورد استفاده در پژوهش حاضر

i	اندیس طریقه حمل کالا ($i = R$ برای طریقه حمل جاده‌ای و $i = M$ برای طریقه حمل ترکیبی)
Q	کل تقاضای کالا از مبدأ به مقصد
θ_u	نرخ مصرف سوخت کامیون جهت حمل واحد تقاضا در واحد مسافت جاده‌ای
θ_a	نرخ مصرف سوخت قطار جهت حمل واحد تقاضا در واحد مسافت ریلی
α	پایه بازار برای تقاضای طریقه حمل جاده‌ای
β_p	کشسانی تقاضا نسبت به قیمت حمل و نقل در طریقه حمل جاده‌ای
β_t	کشسانی تقاضا نسبت به زمان سفر از مبدأ تا مقصد در طریقه حمل جاده‌ای
γ_p	کشسانی متقابل تقاضا نسبت به قیمت حمل و نقل در طریقه حمل ترکیبی
γ_t	کشسانی متقابل تقاضا نسبت به زمان سفر از مبدأ تا مقصد در طریقه حمل ترکیبی
D_i	مسافت حمل و نقل بین مبدأ و مقصد در طریقه حمل i
d	درصدی از مسافت حمل و نقل در طریقه حمل ترکیبی که به صورت جاده‌ای انجام می‌شود ($0 \leq d < 1$).

et al., 2016; Karray and Sigué, 2015; Wei et al., 2013).

-مسافت حمل و نقل بین مبدأ و مقصد در طریقه حمل جاده- ای، بیشتر از بخش جاده‌ای مسافت حمل و نقل در طریقه حمل ترکیبی است ($D_R > d D_M$).

- مسافت حمل و نقل بین مبدأ و مقصد در طریقه حمل ترکیبی به $\frac{\theta_u}{d\theta_u + (1-d)\theta_a}$ برابر مسافت حمل و نقل بین مبدأ و مقصد در طریقه حمل جاده‌ای محدود است ($D_M < D_R \frac{\theta_u}{d\theta_u + (1-d)\theta_a}$).

با لحاظ محدودیت‌های فوق‌الذکر، می‌توان نتیجه گرفت که مسافت حمل و نقل بین مبدأ و مقصد در طریقه حمل ترکیبی بایستی مطابق با نامعادله زیر محدود گردد:

$$D_M < \text{Min} \left(\frac{\beta_p}{d\gamma_p}, \frac{\theta_u}{d\theta_u + (1-d)\theta_a} \right) D_R \quad (1)$$

که در آن، هر دو ضریب $\frac{\beta_p}{d\gamma_p}$ و $\frac{\theta_u}{d\theta_u + (1-d)\theta_a}$ مقادیر بزرگتر از یک هستند.

۲- مدل‌سازی

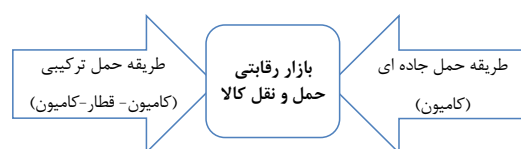
به منظور مدل‌سازی رقابت دو طریقه حمل مورد بررسی در پژوهش حاضر (طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی)، توابع تقاضای هر یک از دو طریقه بایستی مشخص شوند.

در مسئله حاضر، مقدار کل کالاهایی که بایستی از مبدأ تا مقصد جابجا شوند، ثابت و برابر با Q در نظر گرفته شده‌است. در نتیجه، مجموع تقاضای طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی برابر با مقدار Q خواهد بود:

$$Q = q_R + q_M \quad (2)$$

در پژوهش حاضر، تقاضای طریقه حمل جاده‌ای کالا به عنوان تابعی از قیمت و زمان سفر خود آن طریقه، به علاوه قیمت و زمان حل طریقه رقیب (یعنی طریقه حمل ترکیبی) در نظر گرفته شده‌است. همچنین فرض شده‌است که تقاضا، یک تابع خطی از قیمت و زمان سفر است. این فرض، در مقالات مختلفی در نظر گرفته شده‌است (Anderson and Bao, 2010; Chaab and Rasti-Barzoki, 2016; Chen and Wang, 2015; Pan et al., 2010

Aditjandra et al.,) زیست‌محیطی برخوردار است (, 2016; Lin et al., 2017; Sun and Ying, 2014; Tamannaeei et al., 2017). از این رو، اتخاذ سیاست‌های مختلف تأثیرگذار بر قیمت و زمان سفر و نقل کالا (توسط دولت، صاحبان کالا و شرکت‌های لجستیک)، می‌تواند از منظر پایداری و جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی مورد توجه قرار گیرد. با این حال، تأثیرات مداخله دولت در بازار رقابتی حمل و نقل جاده‌ای و ترکیبی با استفاده از سیاست‌های تشویقی و تنبیهی، در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار نمی‌گیرد و مدل‌سازی رقابت دو طریقه حمل، در حالت عدم مداخله دولت در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. رقابت طریقه‌های حمل و نقل مورد بررسی در پژوهش حاضر

فرضیات مورد استفاده:

-کلیه پارامترهای مورد استفاده، نامنفی هستند.

-قیمت‌ها، زمان‌های حمل، و توابع تقاضای هر دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی، غیرمنفی هستند ($t_i > 0$, $p_i > 0$), $q_i > 0$ (به ازای $i = R, M$).

-کلیه وسایل نقلیه مورد استفاده در هر دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی، یک نوع سوخت مصرف می‌کنند (مثلاً گازوئیل).

-به منظور تضمین تعادل توابع سود طریقه‌های حمل و نقل،

$$\text{رابطه } \lambda_2 > \frac{\gamma_t^2}{4\gamma_p} \text{ بین پارامترها برقرار است.}$$

-نرخ مصرف سوخت قطار در حمل واحد تقاضا کمتر از نرخ مصرف سوخت کامیون است ($\theta_a < \theta_u$).

-کشسانی تقاضا نسبت به قیمت (زمان سفر) بزرگتر از کشسانی متقابل تقاضا نسبت به قیمت (زمان سفر) است ($\beta_t > \gamma_t$ و $\beta_p > \gamma_p$)؛ بدین معنا که حساسیت تقاضای یک طریقه حمل به تغییرات قیمت (زمان سفر) خود آن طریقه، بیشتر از حساسیت تقاضای آن به تغییرات قیمت (زمان سفر) طریقه‌ی رقیب است (Dan et al., 2012; Jafari

$$\pi_R = (p_R - \bar{c}_R - D_R \theta_{uf})(\alpha - p_R \beta_p - t_R \beta_t + p_M \gamma_p + t_M \gamma_t) \quad (۸)$$

$$\pi_M = (p_M - \bar{c}_M - d D_M \theta_{uf})(Q - (1-d) D_M \theta_{af})(\alpha - \beta_p p_R + t_R \beta_t - p_M \gamma_p - t_M \gamma_t) - \lambda_M (t_M - \bar{t}_M)^2 \quad (۹)$$

جواب‌های تعادلی

تقاضای حمل و نقل کالا در هر دو طریقۀ جاده‌ای و ترکیبی، تابعی از قیمت و زمان است. در طریقۀ حمل جاده‌ای، زمان سفر غالباً تابع شرایط ترافیکی جاده‌ها است و سیاست‌های اتخاذ شده توسط شرکت‌های لجستیک متولی حمل و نقل، معمولاً به تنهایی تأثیر چندانی در افزایش یا کاهش زمان سفر ندارد. در حالی که در سیستم ترکیبی، می‌توان با اعمال سیاست‌های مختلف نظیر کاهش یا افزایش امکانات تخلیه و بارگیری، زمانبندی حرکت قطارها، اولویت‌دهی به عبور قطارها و... زمان جابجایی کالاها از مبدأ تا مقصد را تا حد زیادی تغییر داد. در پژوهش حاضر، زمان سفر در طریقۀ حمل جاده‌ای (t_R) ثابت در نظر گرفته شده‌است و زمان سفر در طریقۀ ترکیبی (t_M)، به علاوه قیمت حمل و نقل در طریقۀ جاده‌ای (p_R) و قیمت حمل و نقل در طریقۀ ترکیبی (p_M)، به عنوان متغیرهای تصمیم ملحوظ گردیده‌اند. بسته به میزان انعطاف‌پذیری حمل و نقل ترکیبی در یک بازار رقابتی، دو سناریوی مختلف متصور هستند:

سناریوی ۱) سیستم ریلی از انعطاف‌پذیری زیاد برخوردار باشد؛ به نحوی که قابلیت بکارگیری سیاست‌های مختلف (نظیر امکانات تخلیه و بارگیری و اولویت‌دهی به حرکت قطارهای باری و...) جهت تغییر در زمان سفر طریقۀ ترکیبی وجود داشته باشد. این قابلیت در شبکه‌های ریلی که در سطح مطلوبی از امکانات زیرساختی و برنامه‌ریزی قرار دارند وجود دارد.

سناریوی ۲) سیستم ریلی قابلیت انعطاف‌پذیری کم داشته‌باشد؛ به نحوی که امکان تغییرات کوتاه‌مدت و منطبق با نوسانات قیمت‌های بازار رقابتی جهت تغییر در زمان سفر طریقۀ ترکیبی وجود نداشته باشد. شبکه‌های ریلی که از ضعف زیرساخت (خطوط ریلی و ایستگاه‌های ریلی) و نیز ضعف در برنامه‌ریزی

در نتیجه، تابع تقاضای حمل و نقل برای طریقۀ حمل جاده‌ای عبارتست از:

$$q_R = \alpha - \beta_p p_R + \gamma_p p_M - \beta_t t_R + \gamma_t t_M \quad (۳)$$

بدیهی است که تابع تقاضای حمل و نقل برای طریقۀ حمل ترکیبی (q_M) با تفریق کل تقاضا از تقاضای طریقۀ حمل جاده‌ای به دست می‌آید ($q_M = Q - q_R$).

برای هریک از دو طریقۀ حمل، هزینه سوخت تحمیلی به مدیریت شرکت‌های لجستیک (به عنوان فراهم‌آورنده خدمات حمل و نقل)، تابعی از نرخ مصرف سوخت وسایل نقلیه، مسافت حمل و نقل و قیمت یک واحد سوخت می‌باشد. هزینه کل حمل و نقل، شامل مجموع هزینه سوخت و سایر هزینه‌ها (غیر از سوخت) است.

$$c_R = D_R \theta_{uf} + \bar{c}_R \quad (۴)$$

$$c_M = d D_M \theta_{uf} + (1-d) D_M \theta_{af} + \bar{c}_M \quad (۵)$$

که در آن، c_i کل هزینه در طریقۀ حمل i ام (شامل هزینه سوخت و سایر هزینه‌ها (\bar{c}_i)) برای جابجایی یک واحد از تقاضا از مبدأ تا مقصد است. قابل ذکر است که به دلیل استفاده از دو نوع وسیله نقلیه (کامیون و قطار) در طریقۀ حمل ترکیبی، تابع سوخت این طریقۀ از دو جزء (هزینه سوخت در سیستم جاده‌ای و هزینه سوخت در سیستم ریلی) تشکیل شده‌است. در ادامه، تابع سود هریک از طریقۀ حمل ذکر شده‌است.

$$\pi_R = (p_R - c_R) q_R \quad (۶)$$

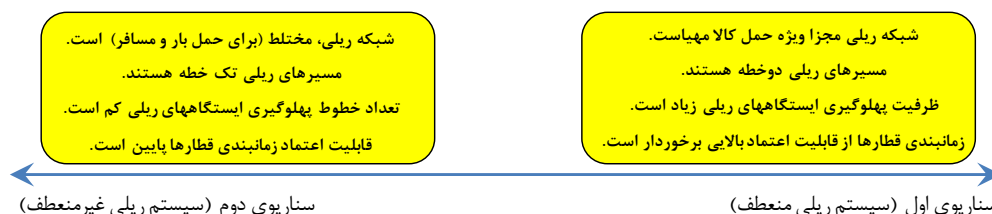
$$\pi_M = (p_M - c_M)(Q - q_R) - \lambda_M (t_M - \bar{t}_M)^2 \quad (۷)$$

در محاسبه تابع سود طریقۀ حمل ترکیبی، عبارت $\lambda_M (t_M - \bar{t}_M)^2$ هزینه سرمایه‌گذاری برای کاهش زمان سفر در حمل و نقل ترکیبی است (مشابه فرضیات در نظر گرفته شده در Madani and Rasti-Barzoki, (2017)).

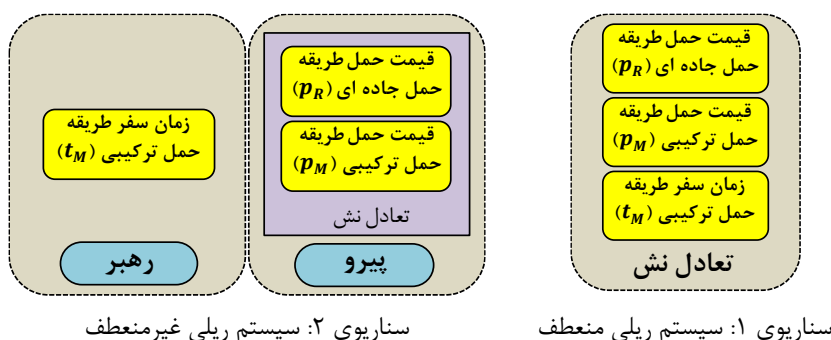
با جایگذاری روابط (۳) و (۴) و (۵) در روابط (۶) و (۷)، توابع سود می‌توانند به صورت زیر بازنویسی شوند:

می‌آید که در آن، هر سه متغیر تصمیم مذکور، به طور همزمان در نظر گرفته می‌شوند. در حالی که در سناریوی ۲، با مشخص بودن مقدار زمان سفر طریقه حمل ترکیبی، مقادیر قیمت‌های تعادلی دو طریقه حمل بایستی محاسبه گردند. به عبارت دیگر، در سیستم ریلی غیرمنعطف، ابتدا زمان سفر طریقه حمل ترکیبی تعیین می‌شود و سپس با توجه به این مقدار، قیمت‌های حمل و نقل مشخص می‌گردند.

و زمانبندی حرکت قطارها رنج می‌برند، با استفاده از شرایط سناریوی ۲ قابل تحلیل می‌باشند. در شکل زیر، تفاوت‌های دو سناریوی مذکور نشان داده شده‌است. در سناریوی ۱ (سیستم ریلی منعطف)، می‌توان مقدار زمان سفر تعادلی طریقه ترکیبی را همزمان با مقادیر قیمت‌های تعادلی دو طریقه حمل، محاسبه نمود. نقطه تعادل متناظر با سناریوی ۱، با استفاده از تعادل نش به دست



شکل ۲. تفاوت‌های بین سیستم‌های ریلی منعطف و غیرمنعطف در پژوهش حاضر



شکل ۳. ساختار بازی سناریوهای رقابت بازار حمل و نقل کالا در پژوهش حاضر

لم ۱: بررسی تقعر توابع سود تابع سود طریقه حمل جاده‌ای π_R نسبت به p_R و تابع سود طریقه حمل ترکیبی (π_M) نسبت به p_M و t_M به طور مشترک، مقعر است. اثبات این لم، به علاوه سایر اثبات‌ها در پیوست ذکر شده‌است.

قضیه ۱: متغیرهای تعادلی نش

قیمت‌های تعادلی حمل و نقل، زمان سفر تعادلی طریقه حمل ترکیبی، توابع تقاضا و توابع سود طریقه‌های حمل در تعادل نش سناریوی ۱ عبارتند از:

نقطه تعادل متناظر با سناریوی ۲، با استفاده از تعادل استکلبرگ (رهبر-پیرو) به دست می‌آید که در آن، زمان سفر طریقه حمل ترکیبی به عنوان رهبر و قیمت‌های حمل و نقل در دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی به عنوان پیروها در نظر گرفته می‌شوند. در شکل زیر، سناریوهای اول و دوم به طور شماتیک نشان داده شده‌اند.

سناریوی ۱: سیستم ریلی منعطف (تعادل نش)

مدل ساختار بازی در سناریوی ۱ (رقابت نش بین طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی) به صورت رابطه ۱۰ است.

$$\begin{cases} \max_{p_R} \pi_R(p_R, p_M, t_M) \\ \max_{p_M, t_M} \pi_M(p_R, p_M, t_M) \end{cases} \quad (10)$$

$$p_R^{Sc.1} = \frac{\left(\frac{\gamma_t^2(Q + \beta_p(\bar{c}_R + D_R\theta_u f))}{-2\gamma_p\lambda_M(Q + \alpha + 2\bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_a f)) + f(2D_R\beta_p + dD_M\gamma_p)\theta_u} \right)}{\beta_p(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)} \quad (11)$$

$$p_M^{Sc.1} = \frac{\left(\frac{2\lambda_M(\alpha - 2Q - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t - \beta_p(\bar{c}_R + D_R\theta_u f)) + \bar{c}_M(\gamma_t^2 - 4\gamma_p\lambda_M) + D_M((1-d)\theta_a f + d\theta_u f)(\gamma_t^2 - 4\gamma_p\lambda_M)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_2} \right)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_2} \quad (12)$$

$$t_M^{Sc.1} = \frac{\left(\frac{\gamma_t(2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_a f)) + \theta_u f(D_R\beta_p - dD_M\gamma_p)}{-6\bar{t}_M\gamma_p\lambda_M} \right)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M} \quad (13)$$

$$q_R^{Sc.1} = \frac{\left(\frac{Q\gamma_t^2 - 2\gamma_p\lambda_M \times ((Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_a f)) + f(dD_M\gamma_p - D_R\beta_p)\theta_u)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M} \right)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M} \quad (14)$$

$$q_M^{Sc.1} = \frac{2\gamma_p\lambda_M \left(\frac{\alpha - 2Q - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_a f) + \theta_u f(dD_M\gamma_p - D_R\beta_p)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M} \right)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M} \quad (15)$$

$$\pi_R^{Sc.1} = \frac{\left(\frac{Q\gamma_t^2 - 2\gamma_p\lambda_M \times ((Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_a f)) + \theta_u f(dD_M\gamma_p - D_R\beta_p))}{\beta_p(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)^2} \right)^2}{\beta_p(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)^2} \quad (16)$$

$$\pi_M^{Sc.1} = \frac{\lambda_M(4\gamma_p\lambda_M - \gamma_t^2) \times \left(\frac{2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - \bar{t}_M\gamma_t - \gamma_p(\bar{c}_M - (1-d)D_M\theta_a f) + \theta_u f(D_R\beta_p - dD_M\gamma_p)}{(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)^2} \right)^2}{(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)^2} \quad (17)$$

به منظور باقی ماندن هر دو طریقه جاده‌ای و ترکیبی در بازار رقابت، قیمت‌های تعادلی حمل و نقل بایستی بزرگتر از هزینه‌های حمل و نقل شوند ($p_M^{Sc.1} > c_M$ و $p_R^{Sc.1} > c_R$). به علاوه، زمان سفر تعادلی طریقه حمل ترکیبی $t_M^{Sc.1}$ و مقادیر تقاضا بایستی مثبت باشند. به منظور ارضای این ملاحظات و نیز سایر فرضیات مربوط به روابط بین پارامترها، بایستی روابط زیر برقرار باشند:

$$\bar{c}_M > \frac{Q\gamma_t^2 - 2\gamma_p\lambda_M(Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t - fD_R\beta_p\theta_u + fD_M\gamma_p((1-d)\theta_a + d\theta_u))}{2\gamma_p^2\lambda_M} \quad (18)$$

$$\bar{c}_M < \frac{2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - \bar{t}_M\gamma_t + fD_R\beta_p\theta_u - fD_M\gamma_p((1-d)\theta_a + d\theta_u)}{\gamma_p} \quad (19)$$

سناریوی ۲: سیستم ریلی غیرمنعطف (تعادل استکلبرگ)

$$\begin{cases} \max_{p_R} \pi_R(p_R) \\ \max_{p_M} \pi_M(p_M) \end{cases} \quad (21)$$

در این سناریو، زمان سفر طبقه حمل ترکیبی t_M به عنوان رهبر استکلبرگ، و قیمت‌های حمل و نقل (p_M و p_R) به عنوان پیروهای استکلبرگ در رقابت نش عمل می‌نمایند.

$$\max_{t_M} \pi_M(t_M, p_R^*, p_M^*) \quad (20)$$

قضیه ۲: متغیرهای تعادلی استکلبرگ

قیمت‌های تعادلی حمل و نقل، زمان سفر تعادلی طبقه حمل ترکیبی، توابع تقاضا و توابع سود طبقه‌های حمل در تعادل استکلبرگ سناریوی ۲ عبارتند از:

که در آن (p_R^*, p_M^*) با حل همزمان توابع زیر بدست می‌آیند:

$$p_R^{Sc.2} = \frac{\left(\frac{\gamma_t^2 (Q + \beta_p(\bar{c}_R + D_R\theta_{uf}))}{-3\gamma_p\lambda_M(Q + \alpha + 2\bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(2D_R\beta_p + dD_M\gamma_p))} \right)}{\beta_p(\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M)} \quad (22)$$

$$p_M^{Sc.2} = \frac{\left(\frac{3\lambda_M(2Q - \alpha + t_R\beta_t - \bar{t}_M\gamma_t + \beta_p(\bar{c}_R + D_R\theta_{uf})) - \bar{c}_M(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)}{+D_M((1-d)f\theta_a + d\theta_{uf})(6\gamma_p\lambda_M - \gamma_t^2)} \right)}{9\gamma_p\lambda_M - \gamma_t^2} \quad (23)$$

$$t_M^{Sc.2} = \frac{\gamma_t(2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(D_R\beta_p - dD_M\gamma_p)) - 9\bar{t}_M\gamma_p\lambda_M}{\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M} \quad (24)$$

$$q_R^{Sc.2} = \frac{\left(\frac{Q\gamma_t^2 - 3\gamma_p\lambda_M \times}{\left((Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(dD_M\gamma_p - D_R\beta_p)) \right)} \right)}{\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M} \quad (25)$$

$$q_M^{Sc.2} = \frac{3\gamma_p\lambda_M(-2Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(dD_M\gamma_p - D_R\beta_p))}{\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M} \quad (26)$$

$$\pi_R^{Sc.2} = \frac{\left(\frac{Q\gamma_t^2 - 3\gamma_p\lambda_M \times}{\left((Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(dD_M\gamma_p - D_R\beta_p)) \right)} \right)^2}{\beta_p(\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M)^2} \quad (27)$$

$$\pi_M^{Sc.2} = \frac{\lambda_M(2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - \bar{t}_M\gamma_t - \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(D_R\beta_p - dD_M\gamma_p))^2}{9\gamma_p\lambda_M - \gamma_t^2} \quad (28)$$

به منظور بقای هر دو طریقه جاده‌ای و ترکیبی در بازار رقابت، و نیز ارضای سایر فرضیات مربوط به روابط بین پارامترها، بایستی روابط زیر برقرار باشند:

$$\bar{c}_M > \frac{Q\gamma_t^2 - 3\gamma_p\lambda_M(Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t - fD_R\beta_p\theta_u + fD_M\gamma_p((1-d)\theta_a + d\theta_u))}{3\gamma_p^2\lambda_M} \quad (29)$$

$$\bar{c}_M < \frac{2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - \bar{t}_M\gamma_t + fD_R\beta_p\theta_u - fD_M\gamma_p((1-d)\theta_a + d\theta_u)}{\gamma_p} \quad (30)$$

علاوه، با گذار از سیستم ریلی منعطف (سناریوی ۱) به سیستم ریلی غیرمنعطف (سناریوی ۲)، تقاضای طریقه حمل جاده‌ای، بیشتر و تقاضای طریقه حمل ترکیبی کمتر می‌گردد. با این حال، گذار از سیستم ریلی منعطف (سناریوی ۱) به سیستم ریلی غیرمنعطف (سناریوی ۲) میزان سود هر دو طریقه‌ی رقیب را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، در سیستم ریلی غیرمنعطف، قیمت تعادلی، تقاضای حمل و نقل و در نتیجه سود طریقه حمل جاده‌ای در مقایسه با مقادیر متناظر در سیستم ریلی منعطف افزایش می‌یابد. همچنین در سیستم ریلی غیرمنعطف، اگرچه قیمت تعادلی و تقاضای طریقه حمل ترکیبی (نسبت به سناریوی ۱) کاهش می‌یابد، ولی افزایش قابل توجه زمان سفر تعادلی این طریقه حمل (که رهبر استکلبرگ محسوب می‌شود)، سبب کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و در نتیجه افزایش سود طریقه حمل ترکیبی می‌گردد. می‌توان نتیجه گرفت که گذار از سیستم ریلی منعطف (تعادل نش) به سیستم ریلی غیرمنعطف (تعادل استکلبرگ)، که در آن زمان سفر طریقه حمل ترکیبی به عنوان رهبر و قیمت‌های دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی به عنوان پیرو عمل نمایند) برای هر دو طریقه‌ی رقیب دارای مطلوبیت است و می‌تواند سبب افزایش سود هر دو آن‌ها شود. این گذار که با افزایش قیمت طریقه حمل جاده‌ای همراه است، سبب کاهش رضایت‌مندی مشتریان این طریقه حمل می‌شود. با این حال، به دلیل افزایش زمان سفر طریقه حمل ترکیبی (پس از گذار مذکور)، مطلوبیت مشتریانی که حساسیت زیادی به زمان سفر کالاهایشان دارند نیز کاهش خواهد یافت. به عبارت دیگر، نقطه تعادل جدید به نفع شرکت‌های لجستیک هر دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی و به ضرر بخش مهمی از مشتریان شکل می‌گیرد.

۳- بررسی سیاست‌های تأثیرگذار بر بازار رقابتی حمل و نقل کالا

در این بخش، تأثیرات سیاست‌های مختلف بر قیمت، زمان سفر، تقاضا و سود هر یک از دو طریقه حمل موردنظر در پژوهش حاضر (جاده‌ای و ترکیبی) تحلیل می‌گردد. سیاست‌های مورد بررسی عبارتند از:

-سیاست گذار از سناریوی ۱ به ۲ و برعکس

-سیاست افزایش قیمت سوخت

-سیاست کاهش هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی

-سیاست کاهش ضریب هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بهبود زمان

سفر طریقه حمل ترکیبی

-سیاست استفاده از کامیون‌های مدرن با مصرف سوخت پایین

در حمل و نقل جاده‌ای.

نقش انعطاف‌پذیری سیستم ریلی بر بازار رقابتی حمل و نقل

قضیه ۳: روابط بین متغیرها در سناریوهای ۱ و ۲

با لحاظ کلیه فرضیات پژوهش و شروط حفظ طریقه‌های رقیب در بازار رقابت، روابط زیر بین قیمت‌های تعادلی، زمان‌های سفر تعادلی، تقاضاها و سودها در سناریوهای ۱ و ۲ همواره برقرار هستند:

$$\begin{cases} p_R^{Sc.1} < p_R^{Sc.2} \\ p_M^{Sc.1} > p_M^{Sc.2} \\ t_M^{Sc.1} < t_M^{Sc.2} \end{cases} \begin{cases} q_R^{Sc.1} < q_R^{Sc.2} \\ q_M^{Sc.1} > q_M^{Sc.2} \end{cases} \begin{cases} \pi_R^{Sc.1} < \pi_R^{Sc.2} \\ \pi_M^{Sc.1} < \pi_M^{Sc.2} \end{cases}$$

نتایج فوق‌الذکر نشان می‌دهند قیمت تعادلی طریقه حمل جاده-

ای و نیز زمان سفر تعادلی طریقه حمل ترکیبی، در سناریوی ۲ (سیستم ریلی غیرمنعطف) بیشتر از سناریوی ۱ (سیستم ریلی منعطف) هستند؛ در حالیکه قیمت تعادلی طریقه حمل ترکیبی، در سیستم ریلی غیرمنعطف کمتر از سیستم ریلی منعطف است. به

فرضیات پژوهش و شروط حفظ طریقه‌های رقیب در بازار رقابت برآورده‌شوند.

$$Q = 1000 \text{ ton} \quad \gamma_p = 1 \quad \beta_p = 2$$

$$\alpha = 1500 \text{ ton} \quad \gamma_t = 0.75 \quad \beta_t = 1.5$$

$$\lambda_M = 0.3 \quad d = 0.1 \quad f = 1.5 \text{ \$}$$

$$D_R = 1500 \text{ km} \quad t_R = 500 \text{ min} \quad \bar{c}_R = 50 \text{ \$}$$

$$D_M = 1500 \text{ km} \quad \bar{t}_M = 1300 \text{ min} \quad \bar{c}_M = 50 \text{ \$}$$

$$\theta_u = 0.1 \text{ liter/km} \quad \theta_a = 0.02 \text{ liter/km}$$

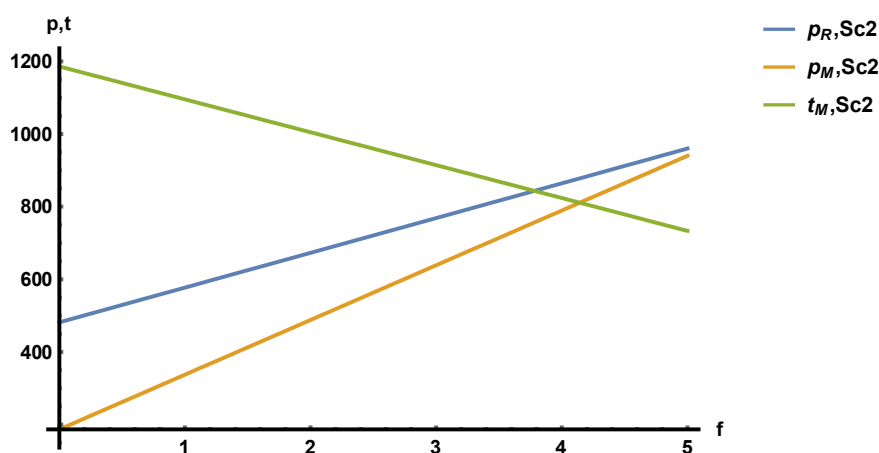
در ارزیابی اثرات سایر سیاست‌ها (بخش ۵-۳ تا ۵-۵) نیز علاوه بر تحلیل پارامتریک، از مقداردهی فوق‌الذکر استفاده شده‌است. در شکل ۴ تا شکل ۶ نمودارهای تغییرات متغیرهای تصمیم، توابع تقاضا و توابع سود نسبت به تغییر قیمت سوخت برای سناریوی ۲ (پس از مقداردهی پارامترها) نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر، کلیه روابط تحلیلی و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار **Mathematica 11** محاسبه و ارائه شده‌اند.

قضیه ۴: برای هر دو سناریوی ۱ و ۲ با لحاظ فرضیات پژوهش، داریم:

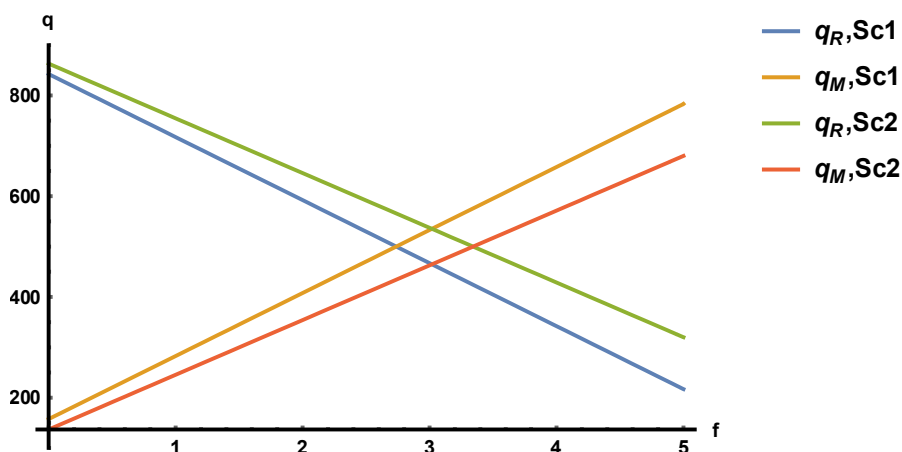
$$\frac{\partial p_R}{\partial f} > 0, \frac{\partial p_M}{\partial f} > 0, \frac{\partial t_M}{\partial f} < 0, \frac{\partial q_R}{\partial f} < 0, \frac{\partial q_M}{\partial f} > 0, \frac{\partial \pi_R}{\partial f} < 0 \text{ و } \frac{\partial \pi_M}{\partial f} > 0.$$

به عبارت دیگر، با افزایش قیمت هر واحد سوخت (f)، قیمت تعادلی هر دو طریقه‌ی حمل جاده‌ای و ترکیبی (به ترتیب p_R و p_M) افزایش و زمان سفر طریقه حمل ترکیبی (t_M) کاهش می‌یابد. همچنین افزایش قیمت سوخت سبب کاهش تقاضا (q_R) و سود (π_R) طریقه حمل جاده‌ای و افزایش تقاضا (q_M) و سود (π_M) طریقه حمل ترکیبی می‌گردد.

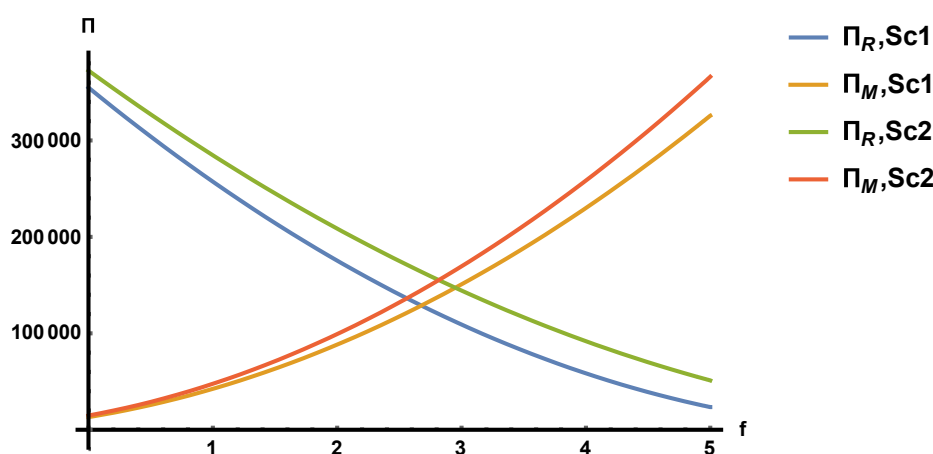
به منظور تحلیل تأثیرات سیاست افزایش قیمت سوخت بر بازار رقابتی حمل و نقل کالا، علاوه بر تحلیل پارامتریک، مقداردهی پارامترها نیز با استفاده از مثال عددی انجام شده‌است. مقادیر پیش‌فرض پارامترها به نحوی انتخاب شده‌اند که کلیه



شکل ۴. تغییرات قیمت و زمان سفر حمل نسبت به تغییرات قیمت سوخت در سناریوی ۲



شکل ۵. تغییرات توابع تقاضای طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی نسبت به تغییرات قیمت سوخت



شکل ۶. تغییرات توابع سود طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی نسبت به تغییرات قیمت سوخت

$$\frac{\partial q_R}{\partial \bar{c}_2} > 0, \frac{\partial t_M}{\partial \bar{c}_2} > 0, \frac{\partial p_M}{\partial \bar{c}_2} > 0, \frac{\partial p_R}{\partial \bar{c}_2} > 0$$

$$\frac{\partial \pi_M}{\partial \bar{c}_2} < 0 \text{ و } \frac{\partial \pi_R}{\partial \bar{c}_2} > 0, \frac{\partial q_M}{\partial \bar{c}_2} < 0$$

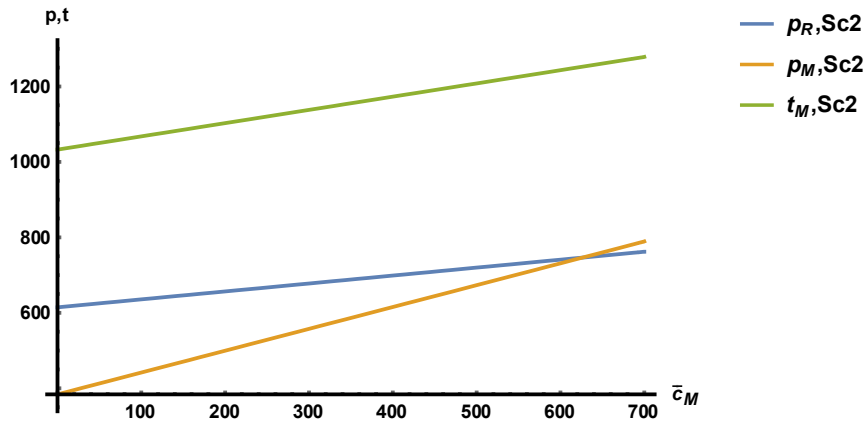
این بدان معناست که با کاهش هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی (\bar{c}_2)، قیمت تعادلی هر دو طریقه‌ی حمل جاده-ای و ترکیبی و زمان سفر طریقه حمل ترکیبی کاهش می‌یابد. همچنین کاهش هزینه‌های مذکور سبب افزایش تقاضا و سود طریقه حمل ترکیبی و کاهش تقاضا و سود طریقه حمل رقیب آن (حمل جاده‌ای) می‌شود. در شکل ۷ تا شکل ۹، نمودار تغییرات متغیرهای تصمیم و توابع تقاضا و سود نسبت به تغییر هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی (پس از مقداردهی پارامترها) نشان داده شده‌است.

سیاست کاهش هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی

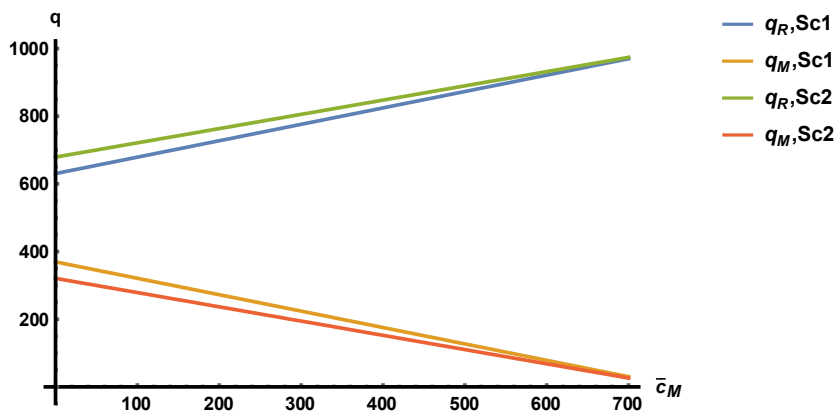
در پژوهش حاضر، به کلیه هزینه‌ها -غیر از هزینه سوخت- که به هریک از طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی برای جابجایی کالا تحمیل می‌شود، هزینه‌های جانبی اطلاق گردیده‌است. در طریقه حمل ترکیبی، هزینه‌های جانبی (\bar{c}_2) شامل هزینه‌های تخلیه و بارگیری و انبارداری در ایستگاه‌های ریلی مبدأ و مقصد می‌باشند.

قضیه ۵: برای هر دو سناریوی ۱ و ۲ با لحاظ فرضیات

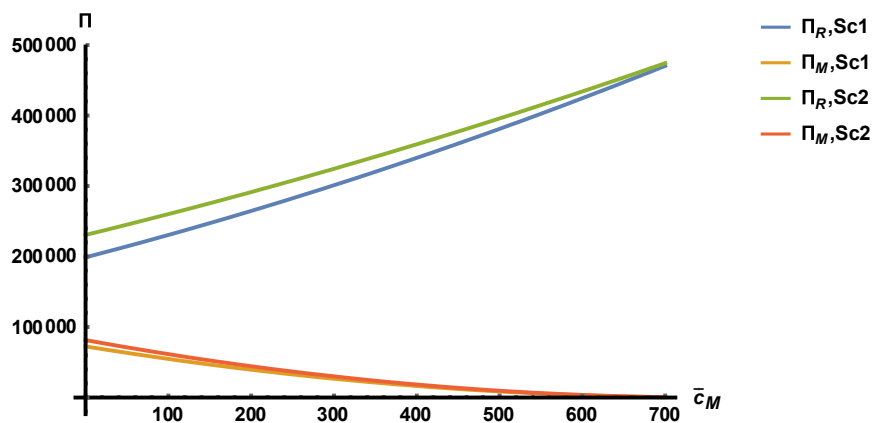
پژوهش، داریم:



شکل ۷. تغییرات قیمت و زمان سفر حمل نسبت به تغییر هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی در سناریوی ۲



شکل ۸. تغییرات توابع تقاضای طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی نسبت به تغییر هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی



شکل ۹. تغییرات توابع سود طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی نسبت به تغییر هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی

لجستیک فراهم‌آورنده خدمات حمل و نقل ترکیبی تحمیل می‌شود و سبب کاهش سود آن شرکت می‌گردد. در این عبارت، مقدار پارامتر λ_M در میزان هزینه سرمایه‌گذاری جهت بهبود زمان سفر مؤثر است. بالا بودن مقدار λ_M به معنای آن

سیاست سرمایه‌گذاری جهت بهبود زمان سفر حمل ترکیبی

در تابع سود طریقه حمل ترکیبی (π_M) مذکور در رابطه (۷)، عبارت $\lambda_M(t_M - \bar{t}_M)^2$ بیانگر هزینه سرمایه‌گذاری جهت بهبود (کاهش) زمان سفر است. این هزینه بر شرکت

$$\begin{cases} \frac{\partial \pi_M}{\partial \lambda_2} > 0 \\ \frac{\partial \pi_M}{\partial \lambda_2} < 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \text{اگر } \lambda_M > \frac{\gamma_t^2}{2\gamma_p} \\ \text{اگر } \frac{\gamma_t^2}{4\gamma_p} < \lambda_M < \frac{\gamma_t^2}{2\gamma_p} \end{cases}$$

به عبارت دیگر، هرچه ضریب هزینه سرمایه‌گذاری بهبود زمان سفر طبقه حمل ترکیبی (λ_M) بیشتر باشد (شرایط به سمت سیستم ریلی غیرمنعطف بیشتر تمایل داشته باشد)، قیمت تعادلی طبقه حمل جاده‌ای بیشتر، قیمت تعادلی طبقه حمل ترکیبی کمتر و زمان سفر حمل ترکیبی بالاتر خواهد بود. در چنین شرایطی، تقاضا و سود طبقه حمل جاده‌ای افزایش می‌یابد و تقاضای طبقه حمل ترکیبی کاهش خواهد یافت. همچنین به ازای λ_M تا مقدار $\frac{\gamma_t^2}{2\gamma_p}$ سود طبقه حمل ترکیبی افزایش و به ازای مقادیر بیشتر، این سود کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۰ تا شکل ۱۲، نمودارهای تغییرات متغیرهای تصمیم و توابع تقاضا و سود نسبت به تغییر هزینه‌های جانبی طبقه حمل ترکیبی (پس از مقداردهی پارامترها) نشان داده شده‌اند (با توجه به فرض مسئله، داریم: $\lambda_2 > \frac{\gamma_t^2}{4\gamma_p}$).

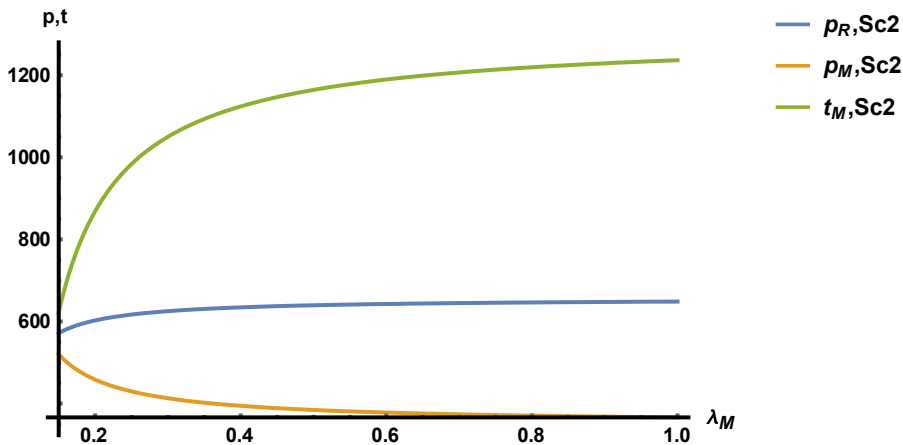
$$\left(\frac{0.75^2}{4 \times 1}\right) = 0.14$$

است که میزان سرمایه‌گذاری جهت بهبود زمان سفر به میزان یک واحد، بالاست. این شرایط معمولاً در موقعیت‌های مشابه با سناریوی ۲ (سیستم ریلی غیرمنعطف) وجود دارد که در آن‌ها، استفاده از روش‌های مختلف بهبود زمان سفر طبقه حمل ترکیبی مستلزم هزینه‌های زیادتری (نسبت به سناریوی ۱) است. روش‌هایی اولویت‌دهی به قطارهای باری، افزایش قابلیت اطمینان زمانبندی حرکت قطارها، کاهش زمان‌های مسدودی خطوط ریلی و... در شرایط وجود سیستم ریلی منعطف، کم‌هزینه‌تر از شرایط وجود سیستم ریلی غیرمنعطف هستند. در نتیجه، می‌توان گفت مقدار λ_M در سناریوی ۱ معمولاً کمتر از سناریوی ۲ است.

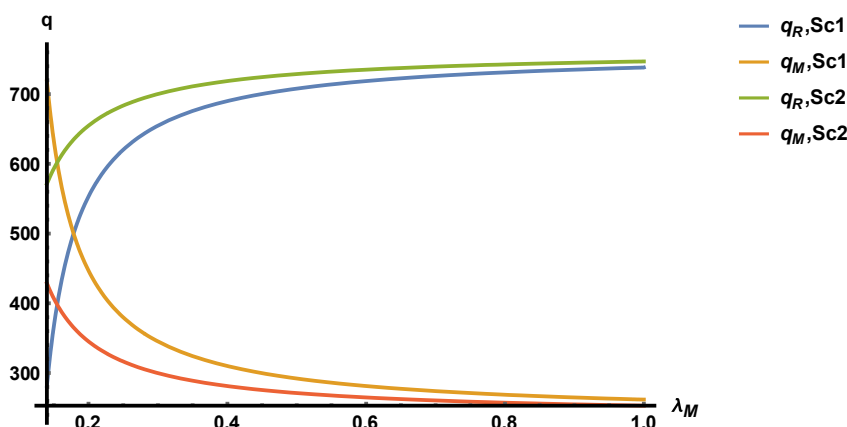
قضیه ۶: برای هر دو سناریوی ۱ و ۲ با لحاظ فرضیات پژوهش، داریم:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q_R}{\partial \lambda_2} > 0, \quad \frac{\partial t_M}{\partial \lambda_2} > 0, \quad \frac{\partial p_M}{\partial \lambda_2} < 0, \quad \frac{\partial p_R}{\partial \lambda_2} > 0 \\ & \frac{\partial \pi_R}{\partial \lambda_2} > 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial q_M}{\partial \lambda_2} < 0 \end{aligned}$$

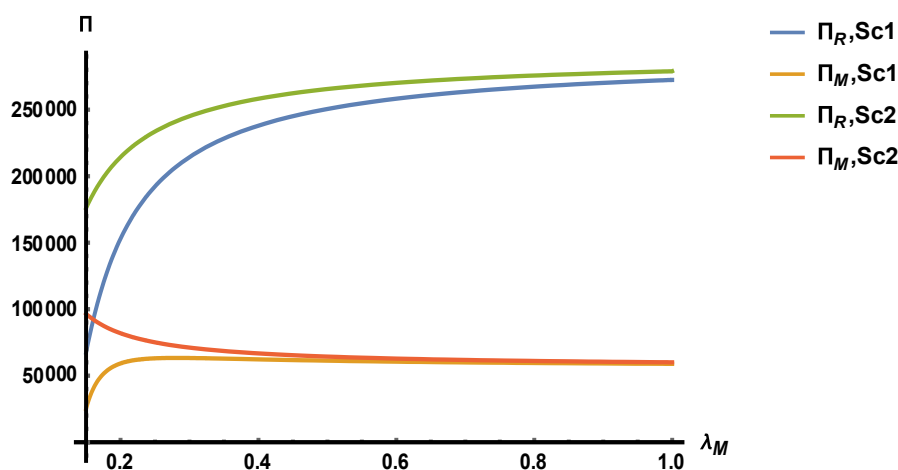
در مورد تابع سود طبقه حمل ترکیبی داریم:



شکل ۱۰. تغییرات قیمت و زمان سفر نسبت به تغییر ضریب هزینه سرمایه‌گذاری بهبود زمان سفر طبقه حمل ترکیبی



شکل ۱۱. تغییرات توابع تقاضا نسبت به تغییر ضریب هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بهبود زمان سفر طبقه حمل ترکیبی



شکل ۱۲. تغییرات توابع سود طبقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی نسبت به تغییر هزینه‌های جانبی طبقه حمل ترکیبی

هرچه نرخ مصرف سوخت کامیون برای حمل واحد کالا در واحد مسافت (θ_u) کاهش بیشتری داشته باشد (به نرخ مصرف سوخت قطار θ_a نزدیکتر باشد)، قیمت تعادلی هر دو طبقه حمل جاده‌ای و ترکیبی کاهش و زمان سفر تعادلی طبقه حمل ترکیبی افزایش خواهد داشت. همچنین کاهش θ_u سبب افزایش تقاضا و سود طبقه حمل جاده‌ای و کاهش تقاضا و سود طبقه حمل ترکیبی می‌شود. در شکل ۱۳ تا شکل ۱۵، نمودارهای تغییرات متغیرهای تصمیم و توابع تقاضا و سود نسبت به تغییر هزینه‌های جانبی طبقه حمل ترکیبی (پس از مقداردهی پارامترها) نشان داده شده‌اند. همچنین در شکل ۱۶ تغییرات سود هر دو طبقه حمل جاده‌ای و ترکیبی نسبت به تغییرات نرخ مصرف سوخت کامیون و قطار نشان داده شده‌است.

سیاست استفاده از کامیون‌های مدرن با مصرف سوخت پایین در حمل و نقل جاده‌ای

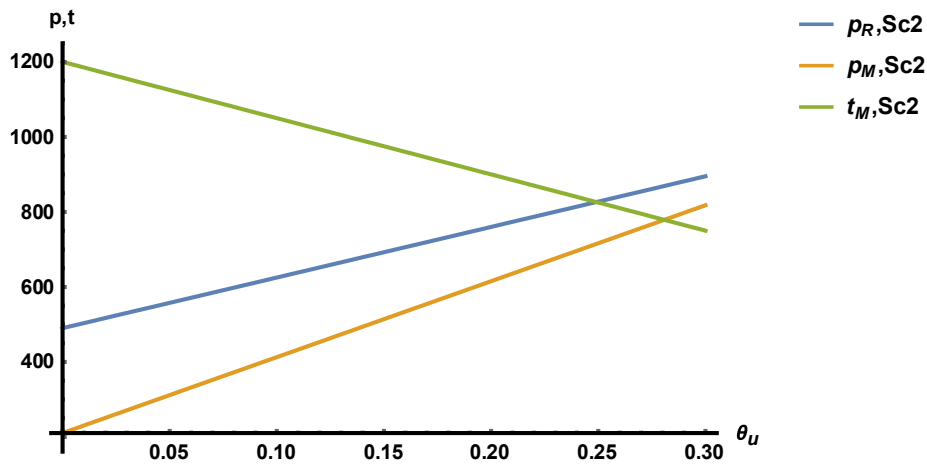
نرخ مصرف سوخت کامیون‌ها در حمل و نقل جاده‌ای کالا، می‌تواند رقابت‌پذیری طبقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی را تحت تأثیر قرار دهد. با ارتقای تکنولوژی تولید کامیون‌های مدرن و پیشرفته، میزان مصرف سوخت این وسایل نقلیه نیز تغییر نموده‌است.

قضیه ۷: برای هر دو سناریوی ۱ و ۲ با لحاظ فرضیات

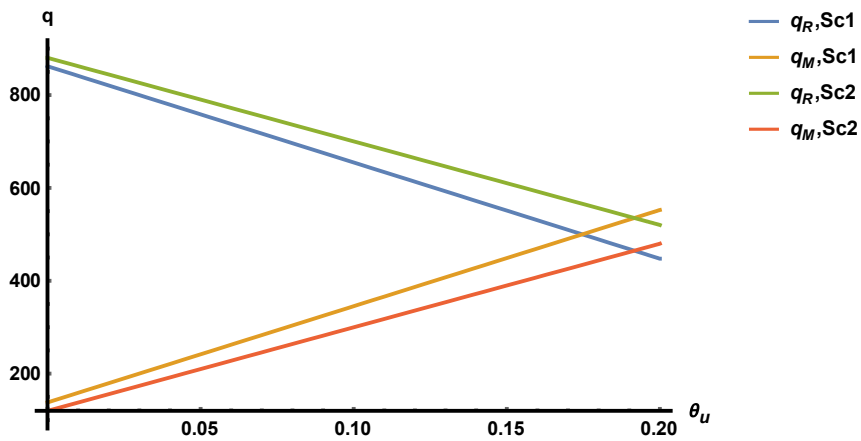
پژوهش، داریم:

$$\frac{\partial q_R}{\partial \theta_u} < 0, \quad \frac{\partial t_M}{\partial \theta_u} < 0, \quad \frac{\partial p_M}{\partial \theta_u} > 0, \quad \frac{\partial p_R}{\partial \theta_u} > 0$$

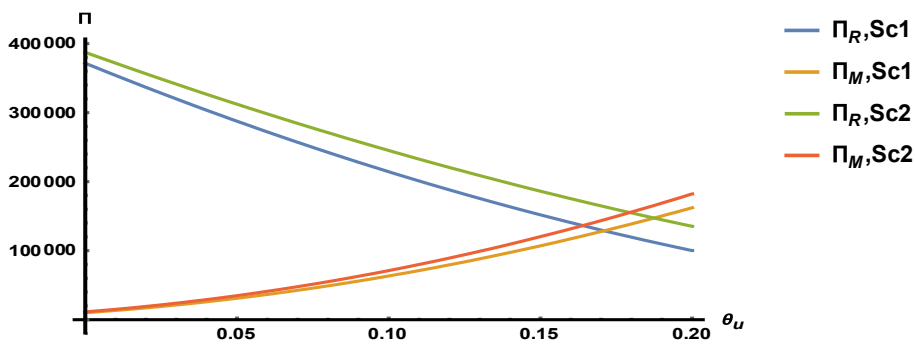
$$\frac{\partial \pi_M}{\partial \theta_u} > 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial \pi_R}{\partial \theta_u} < 0, \quad \frac{\partial q_M}{\partial \theta_u} > 0$$



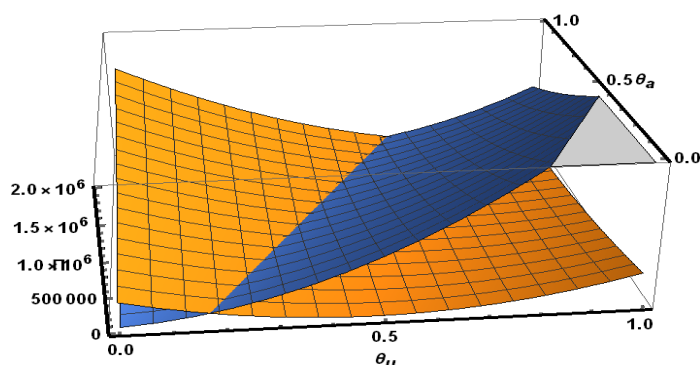
شکل ۱۳. تغییرات قیمت و زمان سفر طریقه‌های حمل نسبت به تغییر نرخ مصرف سوخت کامیون در سناریوی ۲



شکل ۱۴. تغییرات توابع تقاضای طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی نسبت به تغییر نرخ مصرف سوخت کامیون



شکل ۱۵. تغییرات توابع سود طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی نسبت به تغییر نرخ مصرف سوخت کامیون



شکل ۱۶. تغییرات توابع سود طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی نسبت به تغییر نرخ مصرف سوخت کامیون و قطار

۴- نتیجه‌گیری

جاده‌ای کاهش خواهد یافت. سیاست کاهش هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی (هزینه‌هایی غیر از هزینه سوخت، همچون هزینه‌های تخلیه و بارگیری و انبارداری در ایستگاه‌های ریلی مبدأ و مقصد)، قیمت تعادلی هر دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی و زمان سفر طریقه حمل ترکیبی را کاهش می‌دهد و سبب افزایش تقاضا و سود طریقه حمل ترکیبی و کاهش تقاضا و سود طریقه حمل رقیب آن (حمل جاده‌ای) می‌شود. سیاست کاهش ضریب هزینه سرمایه‌گذاری بهبود زمان سفر طریقه حمل ترکیبی (بهبود شرایط زیرساخت ریلی و برنامه‌ریزی حرکت قطارها به سمت سیستم ریلی منعطف)، سبب کاهش زمان سفر طریقه حمل ترکیبی، افزایش قیمت طریقه حمل ترکیبی و کاهش قیمت طریقه حمل جاده‌ای می‌شود. در چنین شرایطی، تقاضا و سود طریقه حمل جاده‌ای کاهش می‌یابد و تقاضای طریقه حمل ترکیبی افزایش خواهد یافت. سیاست استفاده از کامیون‌های مدرن با مصرف سوخت پایین در حمل و نقل جاده‌ای، سبب کاهش قیمت تعادلی هر دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی کاهش و افزایش زمان سفر تعادلی طریقه حمل ترکیبی می‌شود، تقاضا و سود طریقه حمل جاده‌ای را افزایش می‌دهد و کاهش تقاضا و سود طریقه حمل ترکیبی را به دنبال خواهد داشت. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند مورد استفاده گردانندگان شرکت‌های لجستیک جاده‌ای و ریلی و نیز مدیران و سیاستگذاران حمل و نقل جهت تحلیل تأثیرات سیاست‌های مختلف فنی و اقتصادی بر بازار رقابتی حمل و نقل کالا قرار گیرد.

در پژوهش حاضر، مسئله رقابت در بازار حمل و نقل کالا بین طریقه‌های حمل جاده‌ای (کامیون) و ترکیبی (کامیون-قطار-کامیون) برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. بسته به شرایط زیرساخت ریلی، میزان اختلاط شبکه ریلی، ظرفیت خطوط ریلی و قابلیت اطمینان زمانبندی قطارها، دو سناریو (وجود سیستم‌های ریلی منعطف و غیرمنعطف) مورد بررسی قرار گرفتند. قیمت‌های حمل و نقل طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی و زمان سفر طریقه حمل ترکیبی به عنوان متغیرهای تصمیم مسئله در نظر گرفته شدند. در سناریوی ۱، ساختار بازی به صورت تعادل نش است و هر سه متغیر به طور همزمان تعیین می‌شوند؛ در حالی که سناریوی ۲ ساختار استکلبرگ دارد که در آن زمان سفر طریقه حمل ترکیبی به عنوان رهبر و قیمت‌های حمل و نقل به عنوان پیروها می‌باشند. برای هریک از سناریوها، بازار رقابت حمل و نقل کالا مدل-سازی شد و مقادیر تعادلی قیمت، زمان سفر، تقاضا و سود هریک از طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی به صورت توابعی از پارامترهای مختلف مسئله محاسبه گردیدند. به علاوه، در پژوهش حاضر تأثیر سیاست‌های مختلف فنی و اقتصادی بر بازار رقابتی مورد تحلیل قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصله، گذار از سناریوی ۲ (وجود سیستم ریلی غیرمنعطف) به سناریوی ۱ (وجود سیستم ریلی منعطف) برای هر دو طریقه‌ی رقیب نامطلوب است و سبب کاهش سود هر دو آن‌ها می‌شود؛ هرچند این گذار سبب افزایش رضایت‌مندی بخش مهمی از مشتریان خواهد شد. بررسی سیاست افزایش قیمت سوخت نشان داد با اعمال این سیاست، قیمت هر دو طریقه‌ی حمل و نیز تقاضا و سود طریقه حمل ترکیبی افزایش می‌یابد و زمان سفر طریقه حمل ترکیبی و تقاضا و سود طریقه حمل

retail services". *International Journal of Production Economics* 139(1), pp.312-320.

-Feng, F., Liu, C., Liu, H., Ji, Z., (2016), "Research on price of railway freight based on low-carbon economy". *Mathematical Problems in Engineering*.

-Guo, Y., Peeta, S., Mannering, F., (2016), "Rail-truck multimodal freight collaboration: a statistical analysis of freight-shipper perspectives". *Transportation Planning and Technology* 39(5), pp.484-506.

-Jafari, H., Hejazi, S.R., Rasti-Barzoki, M., (2016), "Pricing decisions in dual-channel supply chain including monopolistic manufacturer and duopolistic retailers: a game-theoretic approach". *Journal of Industry, Competition and Trade* 16(3), pp.323-343.

-Jiang, C., Li, H., Hua, G., Ru, Y., (2015), "Multimodal Transportation Government Subsidies Strategy Based Stackelberg Game and DEA", *ICTE 2015*, pp. 274-279.

-Kanafani, A., (1983), "Transportation demand analysis".

-Karray, S., Sigué, S.P., (2015), "A game-theoretic model for co-promotions: Choosing a complementary versus an independent product ally". *Omega* 54, pp.84-100.

-Khosravi, A., Tamannaie M., and Reisi-Nafchi M. (2017), "A comprehensive approach for railway crew scheduling problem (case study: Iranian railway network)." *International Journal of Transportation Engineering* 4.3: pp.197-210.

-Kim, E., Hewings, G.J., Amir, H., (2017), "Economic evaluation of transportation projects: An application of Financial Computable General Equilibrium model". *Research in Transportation Economics* 61, pp.44-55.

-Lin, B., Liu, C., Wang, H., Lin, R., (2017), "Modeling the railway network design problem: A novel approach to considering carbon emissions reduction". *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 56, pp.95-109.

-Aditjandra, P.T., Zunder, T.H., Islam, D.M.Z., Palacin, R., (2016), "Green Rail Transportation: Improving Rail Freight to Support Green Corridors, Green Transportation Logistics. Springer, pp.413-454.

-Anderson, E.J., Bao, Y., (2010), "Price competition with integrated and decentralized supply chains". *European journal of Operational research* 200(1), pp.227-234.

-Bask, A., Bask, A., Rajahonka, M., Rajahonka, M., (2017), "The role of environmental sustainability in the freight transport mode choice: A systematic literature review with focus on the EU". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 47(7), pp.560-602.

-Beuthe, M., Jourquin, B., Geerts, J.-F., a Ndjang'Ha, C.K., (2001), "Freight transportation demand elasticities: a geographic multimodal transportation network analysis". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 37(4), pp.253-266.

-Chaab, J., Rasti-Barzoki, M., (2016), "Cooperative advertising and pricing in a manufacturer-retailer supply chain with a general demand function; A game-theoretic approach". *Computers & Industrial Engineering* 99, pp.112-123.

-Chen, F., Shen, X., Wang, Z., Yang, Y., (2017), "An Evaluation of the Low-Carbon Effects of Urban Rail Based on Mode Shifts. Sustainability 9(3), pp.401-402.

-Chen, X., Wang, X., (2015), "Free or bundled: channel selection decisions under different power structures". *Omega* 53, pp.11-20.

-Cichenski, M., Jaehn, F., Pawlak, G., Pesch, E., Singh, G., Blazewicz, J., (2017), "An integrated model for the transshipment yard scheduling problem". *Journal of Scheduling* 20(1), pp.57-65.

-Dan, B., Xu, G., Liu, C., (2012), "Pricing policies in a dual-channel supply chain with

- Tamannaeci, M., and Rasti-Barzoki, M. (2019), "Mathematical programming and solution approaches for minimizing tardiness and transportation costs in the supply chain scheduling problem." *Computers & Industrial Engineering* 127, pp. 643-656.
- Tamannaeci, M. Irandoost, I. (2019), "Carpooling problem: A. new mathematical model, branch-and-bound, and heuristic beam search algorithm". *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23.3: pp.203-215.
- Tamannaeci, M., Saffarzadeh, M., Jamili, A., & Seyedabrishami, S. (2017), Simultaneous train rescheduling through cancelling, delaying and re-ordering policies: Three-phase solution method with guaranteed optimality. *Scientia Iranica*, 24(1), pp.121-135.
- Sun, C., Ying, X. (2014), "Study on Transportation Problem in Green Logistics, International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2014)". Atlantis Press.
- Wei, J., Zhao, J., Li, Y. (2013), "Pricing decisions for complementary products with firms different market powers". *European Journal of Operational Research* 224(3), pp.507-519.
- Madani, S.R., Rasti-Barzoki, M., (2017), "Sustainable supply chain management with pricing, greening and governmental tariffs determining strategies: A game-theoretic approach". *Computers & Industrial Engineering* 105, pp.287-298.
- Pace, G., Ricci, S., 2018. *Multimodal, Intermodal and Terminals, Sustainable Rail Transport*. Springer, pp. 193-206.
- Pan, K., Lai, K.K., Leung, S.C., Xiao, D., (2010), "Revenue-sharing versus wholesale price mechanisms under different channel power structures". *European Journal of Operational Research* 203(2), pp.532-538.
- Reis, V., (2013), "Rail and multi-modal transport", *Research in Transportation Economics* n. 41. Elsevier.
- Shams, K., Asgari, H., Jin, X., (2017), "Valuation of travel time reliability in freight transportation: A review and meta-analysis of stated preference studies". *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 102, pp.228-243.
- StadieSeifi, M., Dellaert, N.P., Nuijten, W., Van Woensel, T., Raoufi, R., (2014), "Multimodal freight transportation planning: A literature review". *European journal of operational research* 233(1), pp.1-15.

پیوست

اثبات لم ۱:

از آنجایی که $\partial_{p_R}^2 \pi_R = -2\beta_p$ منفی است، تابع سود طریقه حمل جاده‌ای π_R نسبت به p_R مقعر است. همچنین ماتریس هشین تابع سود طریقه حمل ترکیبی π_M برابر با $\begin{pmatrix} -2\gamma_p & -\gamma_t \\ -\gamma_t & -2\lambda_M \end{pmatrix}$ است که با لحاظ فرض $\lambda_M > \frac{\gamma_t^2}{4\gamma_p}$ یک ماتریس منفی قطعی می‌باشد. از این رو، تابع π_M نسبت به p_M و t_M مقعر است. □

اثبات قضیه ۱:

با توجه به لم ۱، بهترین پاسخ^۱ برای متغیرهای p_R ، p_M و t_M از حل شرایط مرتبه اول توابع سود هریک از دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی به دست می‌آید. با حل همزمان دستگاه معادلات $(\partial_{p_R} \pi_R = 0, \partial_{p_M} \pi_M = 0, \partial_{t_M} \pi_M = 0)$ مقادیر تعادلی قیمت‌های حمل و نقل هر دو طریقه و نیز زمان سفر طریقه حمل ترکیبی، یعنی معادلات (۱۱) تا (۱۳) به دست می‌آیند. با جایگزین نمودن این مقادیر در معادلات (۲)، (۳)، (۸) و (۹)، توابع تعادلی تقاضا و سود مطابق با معادلات (۱۴) تا (۱۷) به دست می‌آیند. □

اثبات

$$\begin{cases} \max_{p_R} \pi_R(p_R) \\ \max_{p_M} \pi_M(p_M) \end{cases} \quad (21)$$

قضیه ۲:

از آنجایی که $\partial_{p_R}^2 \pi_R = -2\beta_p$ و $\partial_{p_M}^2 \pi_M = -2\gamma_p$ مقادیری منفی هستند، قیمت‌های تعادلی p_R و p_M حاصل شرایط مرتبه اول، بهترین پاسخ‌ها برای دو طریقه جاده‌ای و ترکیبی (به عنوان پیرو) نسبت به یکدیگر محسوب می‌شوند. با حل همزمان دستگاه معادلات $(\partial_{p_M} \pi_M = 0, \partial_{p_R} \pi_R = 0)$ مقادیر تعادلی قیمت‌ها محاسبه می‌شوند:

$$p_R^* = \frac{(Q + \alpha + 2\bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + t_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(2D_R\beta_p + dD_M\gamma_p))}{3\beta_p}$$

$$p_M^* = \frac{(2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - t_M\gamma_t + 2\gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(D_R\beta_p + 2dD_M\gamma_p))}{3\gamma_p}$$

با جایگزینی این مقادیر در معادله (۷) و ساده‌سازی، معادله (۷) و ساده‌سازی، تابع سود طریقه حمل ترکیبی π_M به عنوان تابعی از t_M به دست می‌آید:

$$\pi_M = \frac{(-2Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + t_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(dD_M\gamma_p - D_R\beta_p))^2}{9\gamma_p} - \lambda_M(t_M - \bar{t}_M)^2$$

با توجه به فرض $\lambda_M > \frac{\gamma_t^2}{4\gamma_p}$ ، عبارت $\partial_{t_M}^2 \pi_M = \frac{2\gamma_t^2}{9\gamma_p} - 2\lambda_M$ منفی است. از این رو، مقدار تعادلی زمان سفر طریقه حمل ترکیبی از شرایط درجه اول به دست می‌آید:

$$t_M^* = t_M^{SC:2} = \frac{\gamma_t(2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(D_R\beta_p - dD_M\gamma_p)) - 9\bar{t}_M\gamma_p\lambda_M}{\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M}$$

^۱ Best Response

با جایگذاری این مقدار در مقادیر p_M^* و p_R^* و نیز در معادلات (۲)، (۳)، (۸) و (۹)، اثبات کامل می‌گردد. □

اثبات قضیه ۳:

قیمت تعادلی حمل طریقه جاده‌ای در سناریوی ۱ ($p_R^{Sc.1}$) برابر است با:

$$p_R^{Sc.1} = \frac{\gamma_t^2(Q + \beta_p(\bar{c}_R + fD_R\theta_u)) - 2\gamma_p\lambda_M(Q + \alpha + 2\bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)fD_M\theta_a) + f(2D_R\beta_p + dD_M\gamma_p)\theta_u)}{\beta_p(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)}$$

قیمت تعادلی حمل طریقه جاده‌ای در سناریوی ۲ ($p_R^{Sc.2}$) برابر است با:

$$p_R^{Sc.2} = \frac{\gamma_t^2(Q + \beta_p(\bar{c}_R + fD_R\theta_u)) - 3\gamma_p\lambda_M(Q + \alpha + 2\bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)fD_M\theta_a) + f(2D_R\beta_p + dD_M\gamma_p)\theta_u)}{\beta_p(\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M)}$$

قرار می‌دهیم:

$$A = \gamma_t^2(Q + \beta_p(\bar{c}_R + fD_R\theta_u))$$

$$B = \gamma_p\lambda_M(Q + \alpha + 2\bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)fD_M\theta_a) + f(2D_R\beta_p + dD_M\gamma_p)\theta_u)$$

با توجه به شرایط شدنی شرایط شدنی (روابط (۱۸)، (۱۹)، (۲۹) و (۳۰)) داریم: $(A - 3B) < (A - 2B) < 0$

همچنین با توجه به فرض $\lambda_M > \frac{\gamma_t^2}{4\gamma_p}$ داریم:

$$(\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M) < (\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M) < 0 \rightarrow \frac{1}{(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)} < \frac{1}{(\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M)} < 0$$

در نتیجه با توجه به $\beta_p > 0$ داریم:

$$\frac{A - 2B}{\beta_p(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)} < \frac{A - 3B}{\beta_p(\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M)} \rightarrow p_R^{Sc.1} < p_R^{Sc.2}$$

سایر روابط بین متغیرها، توابع تقاضا و توابع سود سناریوهای ۱ و ۲ به طریق مشابه اثبات می‌گردد. □

اثبات قضیه ۴:

برای سناریوی ۲ داریم:

$$\frac{\partial p_R}{\partial f} = \frac{3D_M\gamma_p^2((-1+d)\theta_a - d\theta_u)\lambda_M + D_R\beta_p\theta_u(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)}{\beta_p(\gamma_t^2 - 9\gamma_p\lambda_M)}$$

با توجه به فرض $\lambda_M > \frac{\gamma_t^2}{4\gamma_p}$ و نیز $0 < d < 1$ و مثبت بودن مقدار سایر پارامترها داریم: $\frac{\partial p_R}{\partial f} > 0$.

سایر روابط برای هر دو سناریوی ۱ و ۲ و نیز قضایای ۵ و ۶ و ۷ به طریق مشابه اثبات می‌گردد. □