

# 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، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [m.tamannaei@cc.iut.ac.ir](mailto:m.tamannaei@cc.iut.ac.ir)

دریافت: ۹۷/۰۸/۲۷ - پذیرش: ۹۸/۰۲/۰۴

صفحه ۲۰-۱

### 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 زیرساخت 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

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 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

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 قرار دادند. 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 گرفته‌است. مدل پیشنهادی، با هدف ارتقای کارایی سیستم حمل و نقل کالا و راهنمایی مشتریان دوستدار حفظ محیط زیست حاصل گردیده‌است.

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. در (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 گردیده‌است. 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 گرفته‌است. در بخش ۲، مسئله مورد بررسی پژوهش تعریف و توضیح داده شده‌است. در بخش ۳ بر مبنای دو سناریوی انعطاف‌پذیری سیستم ریلی، بازار رقابت حمل و نقل کالا مدل‌سازی گردیده‌است. 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 گرفته‌است. در انتها جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده‌است.

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

تولید، توزیع و زنجیره تأمین انواع کالاها، بدون فراهم‌آوری خدمات مطلوب حمل و نقل همچون قیمت مناسب حمل و زمان منطقی حمل و نقل کالا، قادر به ادامه رقابت اقتصادی با طریقه‌های مختلف موجود در بازار حمل و نقل کالا نیستند (Tamannaeei, et al., 2019) (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 (Tamannaeei, 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 (Khosravi, et al., 2017) (Cichenski et al., 2017). با این حال، جنبه‌های زیست‌محیطی 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 شده‌است.

مروری ساختارمند بر ادبیات موضوع حمل و نقل ترکیبی (StadieSeifi et al., 2014) ارائه شده‌است. 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 گرفته‌است. (Jiang et al., 2015)

$\gamma_t$	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 ( $0 \leq d < 1$ ).
$\lambda_i$	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 $i$
$\pi_i$	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 (Kim et al., Kanafani, 1983; Pace and Ricci, 2017). 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

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 وسیله 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 واگن‌های 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 واگن‌های 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 ( $R = i$ برای طریقه حمل جاده‌ای و $M = i$ برای طریقه حمل ترکیبی)
$Q$	کل تقاضای کالا از مبدأ به مقصد
$\theta_u$	نرخ مصرف سوخت کامیون جهت حمل واحد تقاضا در واحد مسافت جاده‌ای
$\theta_a$	نرخ مصرف سوخت قطار جهت حمل واحد تقاضا در واحد مسافت ریلی
$\alpha$	پایه بازار برای تقاضای طریقه حمل جاده‌ای
$\beta_p$	کشسانی تقاضا نسبت به قیمت حمل و نقل در طریقه حمل جاده‌ای
$\beta_t$	کشسانی تقاضا نسبت به زمان سفر از مبدأ تا مقصد در طریقه حمل جاده‌ای
$\gamma_p$	کشسانی متقابل تقاضا نسبت به قیمت حمل و نقل در طریقه حمل ترکیبی

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

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

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 هریک 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 (Chaab and Rasti-Anderson and Bao, 2010);

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 زیست‌محیطی برخوردار است (et al., 2017).  
 (Tamannaei, Lin et Aditjandra et al., 2016); (al., 2017; Sun and Ying, 2014). 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 ( $p_i > 0$ ،  $t_i > 0$ ،  $q_i > 0$  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،

$$\text{رابطه } \lambda_2 > \frac{\gamma_t^2}{4\gamma_p}$$

-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

Error! و Reference source not found.

Reference source not found. در روابط (۴) و

(۵)، توابع سود می‌توانند به صورت زیر بازنویسی شوند:

$$\pi_R = (p_R - \bar{c}_R - D_R \theta_{uf}) (\alpha - p_R \beta_p - t_R \beta_t + p_M \gamma_p + t_M \gamma_t) \quad (۶)$$

$$\pi_M = (p_M - \bar{c}_M - d D_M \theta_{uf} - (1-d) D_M \theta_{af}) (Q - \alpha + p_R \beta_p + t_R \beta_t - p_M \gamma_p - t_M \gamma_t) - \lambda_M (t_M - \bar{t}_M)^2 \quad (۷)$$

#### جواب‌های تعادلی

تقاضای حمل و نقل کالا در هر دو طریقه جاده‌ای و ترکیبی، تابعی از قیمت و زمان است. در طریقه 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 را تا حد زیادی تغییر داد. در پژوهش حاضر، زمان سفر در طریقه حمل جاده‌ای ( $t_R$ ) ثابت در نظر گرفته شده است و زمان سفر در طریقه ترکیبی ( $t_M$ )، به علاوه قیمت حمل و نقل در طریقه جاده‌ای ( $p_R$ ) و قیمت حمل و نقل در طریقه 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 طریقه ترکیبی وجود داشته باشد. این قابلیت در شبکه‌های ریلی که در سطح مطلوبی از امکانات زیرساختی و برنامه‌ریزی قرار دارند وجود دارد.

Barzoki, 2016; Chen and Wang, 2015; Pan

et al., 2010). در نتیجه، تابع تقاضای حمل و نقل برای

طریقه 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 طریقه حمل ترکیبی ( $q_M$ ) با تفریق کل تقاضا از تقاضای طریقه حمل جاده‌ای به دست می‌آید ( $q_M = Q - q_R$ ).

برای هر یک از دو طریقه 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.

(۴)

$$c_R = D_R \theta_{uf} + \bar{c}_R$$

(۵)

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

که در آن،  $c_i$  کل هزینه در طریقه 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 طریقه حمل ترکیبی، تابع سوخت این طریقه از دو جزء (هزینه سوخت در سیستم جاده‌ای و هزینه سوخت در سیستم ریلی) تشکیل شده است. در ادامه، تابع سود هر یک از طریقه‌های حمل ذکر شده است.

$$\pi_R = (p_R - c_R) q_R \quad (۴)$$

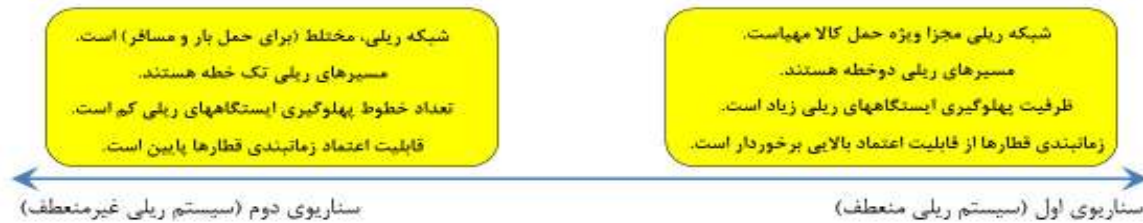
$$\pi_M = (p_M - c_M) (Q - q_R) - \lambda_M (t_M - \bar{t}_M)^2 \quad (۵)$$

در محاسبه تابع سود طریقه 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)).

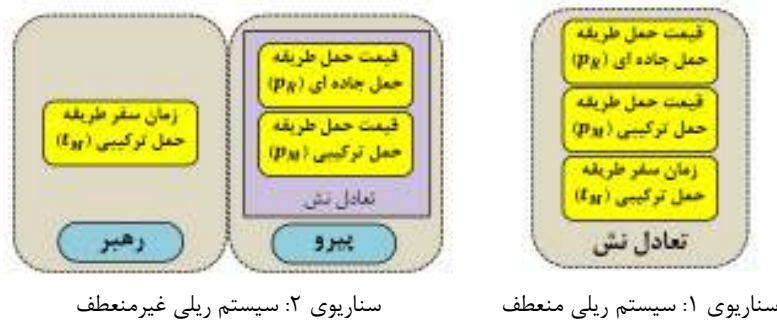
با جایگذاری روابط (۳) و Error!

مقادیر قیمت‌های تعادلی دو طریقه حمل، محاسبه نمود. نقطه تعادل متناظر با سناریوی ۱، با استفاده از تعادل نش به دست 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.

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



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

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

لم ۱: بررسی تعریف توابع سود

تابع سود طریقه حمل جاده‌ای  $\pi_R$  نسبت به  $p_R$  و تابع سود طریقه حمل ترکیبی ( $\pi_M$ ) نسبت به  $p_M$  و  $t_M$  به طور مشترک، مقعر است.

اثبات این لم، به علاوه سایر اثبات‌ها در پیوست ذکر شده‌است.

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.

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:

(۱۱)

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

$$p_M^{SC.1} = \frac{\left( 2\lambda_M(\alpha - 2Q - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t - \beta_p(\bar{c}_R + D_R\theta_{uf})) + \bar{c}_M(\gamma_t^2 - 4\gamma_p\lambda_M) + D_M((1-d)\theta_{af} + d\theta_{uf})(\gamma_t^2 - 4\gamma_p\lambda_M) \right)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_2} \quad (۱۲)$$

$$t_M^{SC.1} = \frac{\left( \gamma_t(2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(D_R\beta_p - dD_M\gamma_p)) - 6\bar{t}_M\gamma_p\lambda_M \right)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M} \quad (۸)$$

$$q_R^{SC.1} = \frac{\left( Q\gamma_t^2 - 2\gamma_p\lambda_M \times ((Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + f(dD_M\gamma_p - D_R\beta_p)\theta_u) \right)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M} \quad (۹)$$

$$q_M^{SC.1} = \frac{2\gamma_p\lambda_M \left( \alpha - 2Q - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(dD_M\gamma_p - D_R\beta_p) \right)}{\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M} \quad (۱۰)$$

$$\pi_R^{SC.1} = \frac{\left( Q\gamma_t^2 - 2\gamma_p\lambda_M \times ((Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t + \gamma_p(\bar{c}_M + (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(dD_M\gamma_p - D_R\beta_p)) \right)^2}{\beta_p(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)^2} \quad (۱۱)$$

$$\pi_M^{SC.1} = \frac{\lambda_M(4\gamma_p\lambda_M - \gamma_t^2) \times (2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - \bar{t}_M\gamma_t - \gamma_p(\bar{c}_M - (1-d)D_M\theta_{af}) + \theta_{uf}(D_R\beta_p - dD_M\gamma_p))^2}{(\gamma_t^2 - 6\gamma_p\lambda_M)^2} \quad (۱۲)$$

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:

$$\bar{c}_M > \frac{Q\gamma_t^2 - 2\gamma_p\lambda_M(Q + \alpha - \bar{c}_R\beta_p - t_R\beta_t + \bar{t}_M\gamma_t - fD_R\beta_p\theta_u + fD_M\gamma_p((1-d)\theta_a + d\theta_u))}{2\gamma_p^2\lambda_M} \quad (۱۳)$$

$$\bar{c}_M < \frac{2Q - \alpha + \bar{c}_R\beta_p + t_R\beta_t - \bar{t}_M\gamma_t + fD_R\beta_p\theta_u - fD_M\gamma_p((1-d)\theta_a + d\theta_u)}{\gamma_p} \quad (۱۴)$$

$$\begin{cases} \max_{p_R} \pi_R(p_R) \\ \max_{p_M} \pi_M(p_M) \end{cases} \quad (16)$$

قضیه ۲: متغیرهای تعادلی استکلبرگ

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

سناریوی ۲: سیستم ریلی غیرمنعطف (تعادل استکلبرگ)

در این سناریو، زمان سفر طریقه 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.

$$\max_{t_M} \pi_M(t_M, p_R^*, p_M^*) \quad (15)$$

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

$$p_R^{Sc.2} = \frac{\left( \frac{\gamma_t^2 (Q + \beta_p (\bar{c}_R + D_R \theta_{uf}))}{-3\gamma_p \lambda_M (Q + \alpha + 2\bar{c}_R \beta_p - t_R \beta_t + \bar{t}_M \gamma_t + \gamma_p (\bar{c}_M + (1-d) D_M \theta_{af})) + \theta_{uf} (2D_R \beta_p + d D_M \gamma_p)} \right)}{\beta_p (\gamma_t^2 - 9\gamma_p \lambda_M)} \quad (17)$$

$$p_M^{Sc.2} = \frac{\left( \frac{3\lambda_M (2Q - \alpha + t_R \beta_t - \bar{t}_M \gamma_t + \beta_p (\bar{c}_R + D_R \theta_{uf})) - \bar{c}_M (\gamma_t^2 - 6\gamma_p \lambda_M)}{+ D_M ((1-d) f \theta_a + d \theta_{uf}) (6\gamma_p \lambda_M - \gamma_t^2)} \right)}{9\gamma_p \lambda_M - \gamma_t^2} \quad (18)$$

$$t_M^{Sc.2} = \frac{\gamma_t (2Q - \alpha + \bar{c}_R \beta_p + t_R \beta_t - \gamma_p (\bar{c}_M + (1-d) D_M \theta_{af})) + \theta_{uf} (D_R \beta_p - d D_M \gamma_p) - 9\bar{t}_M \gamma_p \lambda_M}{\gamma_t^2 - 9\gamma_p \lambda_M} \quad (19)$$

$$q_R^{Sc.2} = \frac{\left( \frac{Q \gamma_t^2 - 3\gamma_p \lambda_M \times (Q + \alpha - \bar{c}_R \beta_p - t_R \beta_t + \bar{t}_M \gamma_t + \gamma_p (\bar{c}_M + (1-d) D_M \theta_{af})) + \theta_{uf} (d D_M \gamma_p - D_R \beta_p)}{\gamma_t^2 - 9\gamma_p \lambda_M} \right)}{\gamma_t^2 - 9\gamma_p \lambda_M} \quad (20)$$

$$q_M^{Sc.2} = \frac{3\gamma_p \lambda_M (-2Q + \alpha - \bar{c}_R \beta_p - t_R \beta_t + \bar{t}_M \gamma_t + \gamma_p (\bar{c}_M + (1-d) D_M \theta_{af})) + \theta_{uf} (d D_M \gamma_p - D_R \beta_p)}{\gamma_t^2 - 9\gamma_p \lambda_M} \quad (21)$$

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

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

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:

$$\bar{c}_M > \frac{Q \gamma_t^2 - 3\gamma_p \lambda_M (Q + \alpha - \bar{c}_R \beta_p - t_R \beta_t + \bar{t}_M \gamma_t - f D_R \beta_p \theta_u + f D_M \gamma_p ((1-d) \theta_a + d \theta_u))}{3\gamma_p^2 \lambda_M} \quad (24)$$

$$\bar{c}_M < \frac{2Q - \alpha + \bar{c}_R \beta_p + t_R \beta_t - \bar{t}_M \gamma_t + f D_R \beta_p \theta_u - f D_M \gamma_p ((1-d) \theta_a + d \theta_u)}{\gamma_p} \quad (25)$$



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 طریق‌ه 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 این‌حال، 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.

#### سیاست افزایش قیمت سوخت

**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 طریق‌ه 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 ( $\pi_R$ ) طریق‌ه حمل جاده‌ای و افزایش تقاضا ( $q_M$ ) و سود ( $\pi_M$ ) طریق‌ه حمل ترکیبی می‌گردد.

به منظور تحلیل تأثیرات سیاست افزایش قیمت سوخت بر بازار رقابتی حمل و نقل کالا، علاوه بر تحلیل پارامتریک، مقادیر پارامترها نیز با استفاده از مثال عددی انجام شده‌است. مقادیر پیش‌فرض پارامترها به نحوی انتخاب شده‌اند که کلیه فرضیات پژوهش و شروط حفظ طریق‌ه‌های رقیب در بازار رقابت برآورده شوند.

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

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

### 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 جاده‌ای 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 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

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 شده است. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر، کلیه روابط تحلیلی و نمودارها با استفاده از نرم افزار Mathematica 11 محاسبه و ارائه شده اند.

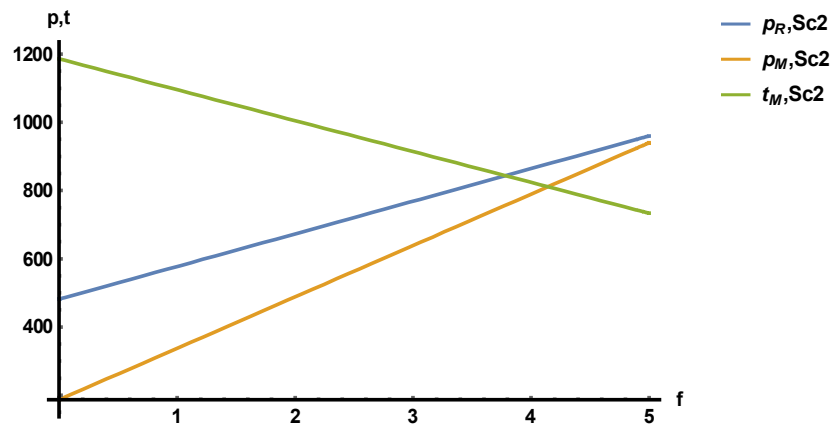
$$\lambda_M = 0.3 \quad d = 0.1 \quad f = 1.5 \$$$

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

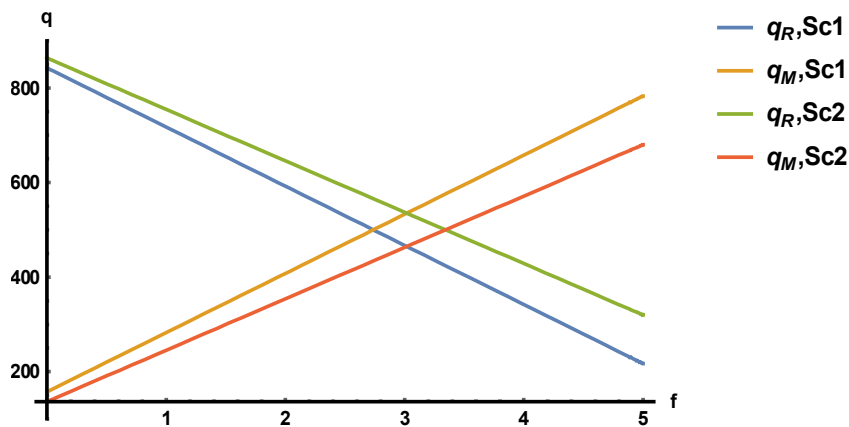
$$D_M = 1500 \text{ km} \quad \bar{t}_M = 1300 \text{ min} \quad \bar{c}_M = 50 \$$$

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

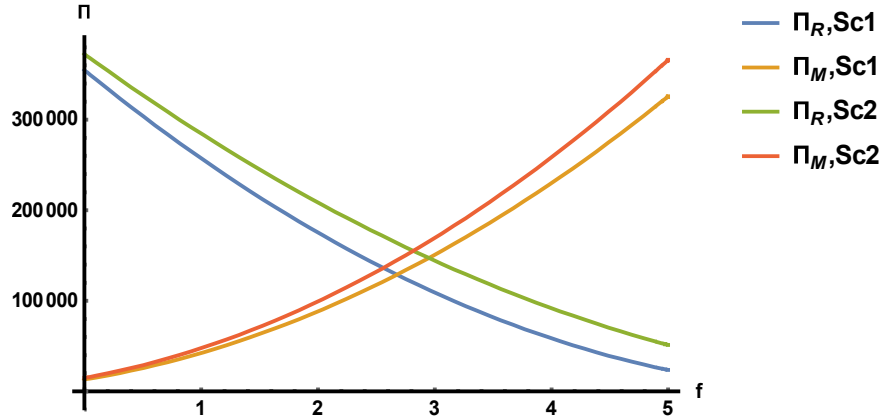
در ارزیابی اثرات سایر سیاستها (بخش ۵-۳ تا ۵-۵) نیز علاوه بر تحلیل پارامتریک، از مقداردهی فوق الذکر استفاده شده است.



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

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

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

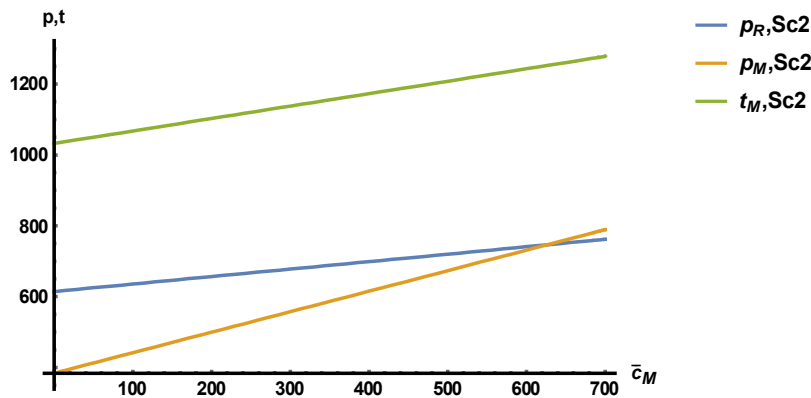
سیاست کاهش هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی

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.

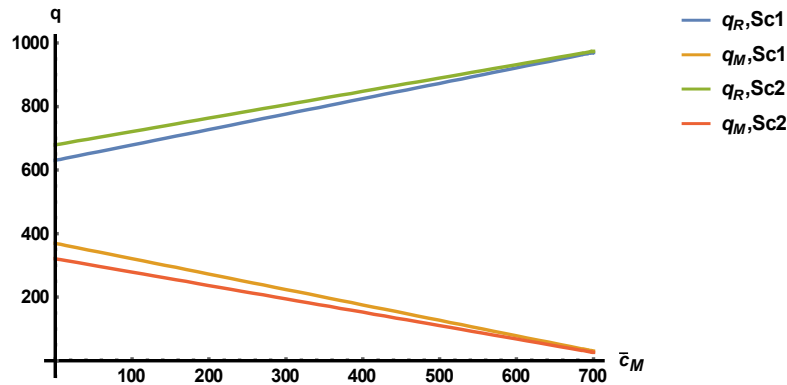
**قضیه ۵:** برای هر دو سناریوی ۱ و ۲ با لحاظ فرضیات

پژوهش، داریم:

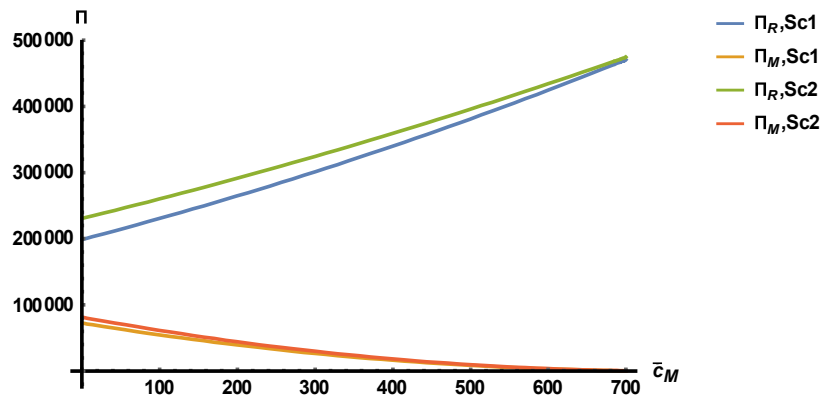
این بدان معناست که با کاهش هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی ( $\bar{c}_2$ )، قیمت تعادلی هر دو طریقه‌ی حمل جاده‌ای و ترکیبی و زمان سفر طریقه حمل ترکیبی کاهش می‌یابد. همچنین کاهش هزینه‌های مذکور سبب افزایش تقاضا و سود طریقه حمل ترکیبی و کاهش تقاضا و سود طریقه حمل رقیب آن (حمل جاده‌ای) می‌شود. در شکل ۷ 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.



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

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  $\lambda_M$  در سناریوی ۱ معمولاً کمتر از سناریوی ۲ است.

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

$$\frac{\partial q_R}{\partial \lambda_2} > 0, \quad \frac{\partial \pi_R}{\partial \lambda_2} > 0, \quad \frac{\partial p_M}{\partial \lambda_2} < 0, \quad \frac{\partial p_R}{\partial \lambda_2} > 0$$

$$\frac{\partial q_M}{\partial \lambda_2} < 0 \text{ و } \frac{\partial \pi_M}{\partial \lambda_2} > 0. \text{ در مورد تابع سود طریقه حمل ترکیبی داریم:}$$

سیاست سرمایه‌گذاری جهت بهبود زمان سفر حمل ترکیبی

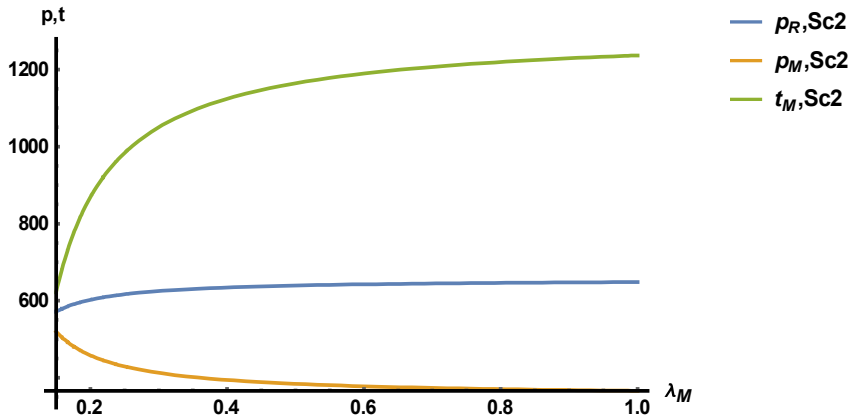
در تابع سود طریقه حمل ترکیبی ( $\pi_M$ ) مذکور در رابطه (۷)، عبارت  $\lambda_M(t_M - \bar{t}_M)^2$  بیانگر هزینه سرمایه‌گذاری جهت بهبود (کاهش) زمان سفر است. این هزینه بر شرکت لجستیک فراهم‌آورنده خدمات حمل و نقل ترکیبی تحمیل می‌شود و سبب کاهش سود آن شرکت می‌گردد. در این عبارت، مقدار پارامتر  $\lambda_M$  در میزان هزینه سرمایه‌گذاری جهت بهبود زمان سفر مؤثر است. بالا بودن مقدار  $\lambda_M$  به معنای آن 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 طریقه حمل ترکیبی مستلزم هزینه‌های زیادتری (نسبت به سناریوی ۱) است. روش‌هایی همچون

حمل جاده‌ای افزایش می‌یابد و تقاضای طریقه حمل ترکیبی کاهش خواهد یافت. همچنین به ازای  $\lambda_M$  تا مقدار  $\frac{\gamma_E^2}{2\gamma_p}$  سود طریقه حمل ترکیبی افزایش و به ازای مقادیر بیشتر، این سود کاهش می‌یابد.

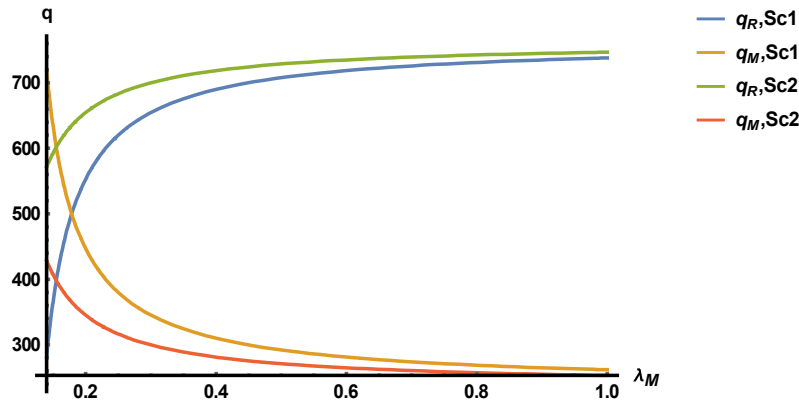
در شکل ۱۰ تا شکل ۱۲، نمودارهای تغییرات متغیرهای تصمیم و توابع تقاضا و سود نسبت به تغییر هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی (پس از مقداردهی پارامترها) نشان داده شده‌اند (با توجه به فرض مسئله، داریم:  $\lambda_2 > \frac{\gamma_E^2}{4\gamma_p} = \frac{0.75^2}{4 \times 1} = 0.14$ )

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

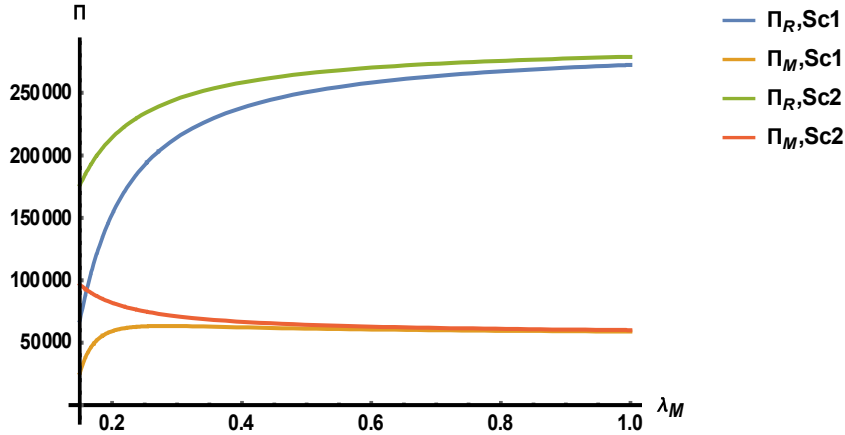
به عبارت دیگر، هرچه ضریب هزینه سرمایه‌گذاری بهبود زمان سفر طریقه حمل ترکیبی ( $\lambda_M$ ) بیشتر باشد (شرایط به سمت سیستم ریلی غیرمنعطف بیشتر تمایل داشته باشد)، قیمت تعادلی طریقه‌ی حمل جاده‌ای بیشتر، قیمت تعادلی طریقه‌ی حمل ترکیبی کمتر و زمان سفر حمل ترکیبی بالاتر خواهد بود. در چنین شرایطی، تقاضا و سود طریقه



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



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



شکل ۱۲. تغییرات توابع سود طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی نسبت به تغییر هزینه‌های جانبی طریقه حمل ترکیبی

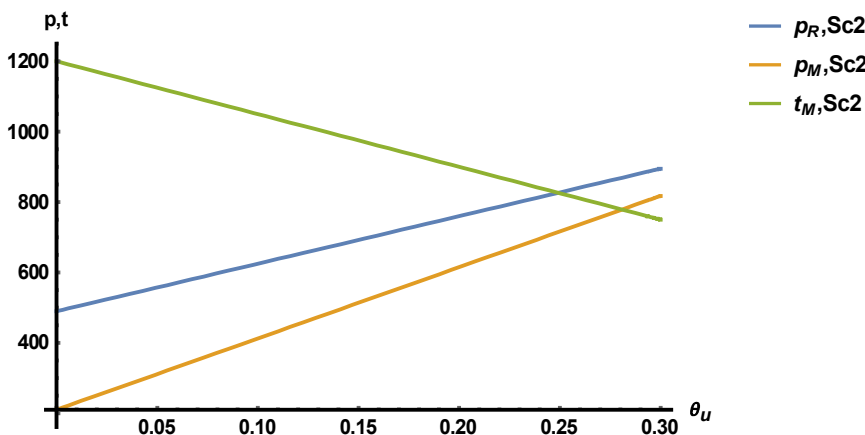
هرچه نرخ مصرف سوخت کامیون برای حمل واحد کالا در واحد مسافت ( $\theta_u$ ) کاهش بیشتری داشته باشد (به نرخ مصرف سوخت قطار  $\theta_a$  نزدیکتر باشد)، قیمت تعادلی هر دو طریقه حمل جاده‌ای و ترکیبی کاهش و زمان سفر تعادلی طریقه حمل ترکیبی افزایش خواهد داشت. همچنین کاهش  $\theta_u$  سبب افزایش تقاضا و سود طریقه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

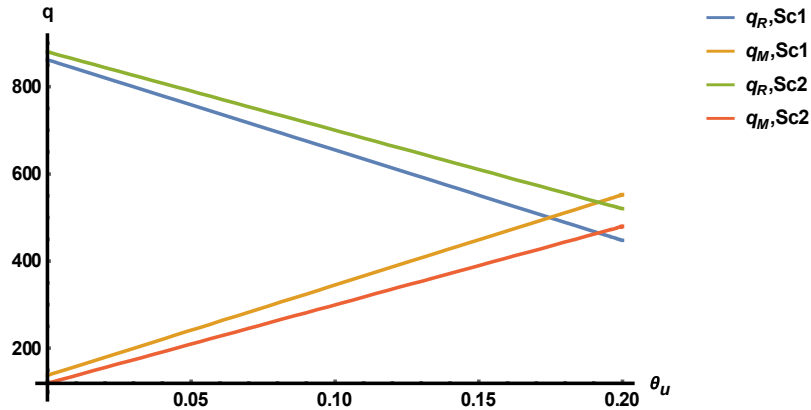
نرخ مصرف سوخت کامیون‌ها در حمل و نقل جاده‌ای کالا، می‌تواند رقابت‌پذیری طریقه‌های حمل جاده‌ای و ترکیبی را تحت تأثیر قرار دهد. با ارتقای تکنولوژی تولید کامیون‌های مدرن و پیشرفته، میزان مصرف سوخت این وسایل نقلیه نیز تغییر نموده‌است.

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

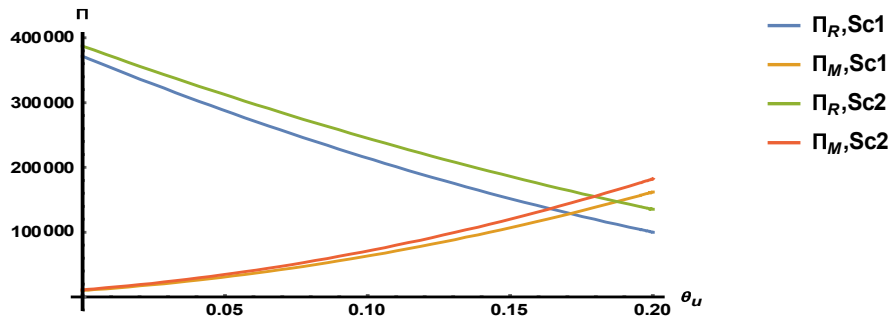
$$\frac{\partial q_R}{\partial \theta_u} < 0, \frac{\partial t_M}{\partial \theta_u} < 0, \frac{\partial p_M}{\partial \theta_u} > 0, \frac{\partial p_R}{\partial \theta_u} > 0, \frac{\partial \pi_M}{\partial \theta_u} > 0 \text{ و } \frac{\partial \pi_R}{\partial \theta_u} < 0, \frac{\partial q_M}{\partial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



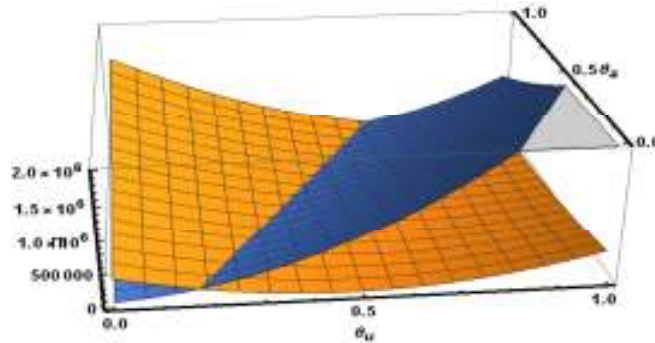
شکل ۱۳. تغییرات قیمت و زمان سفر طریقه‌های حمل نسبت به تغییر نرخ مصرف سوخت کامیون در سناریوی ۲



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- نتیجه گیری

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

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

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.

## ۶- مراجع

-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

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 هر یک از سناریوها، بازار رقابت حمل و نقل کالا مدل‌سازی شد و مقادیر تعادلی قیمت، زمان سفر، تقاضا و سود هر یک 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 گرفته‌است. 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 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 طریقه‌ی 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 جاده‌ای می‌شود. سیاست کاهش ضریب هزینه‌ی 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 طریقه‌ی 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



- 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.
- 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.
- Tamannaeei, 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.
- 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 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., Tamannaeei 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

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.

-Tamannaee, 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.

-Tamannaee, M., Saffarzadeh, M., Jamili, A., & Seyedabrishami, S. (2017), Simultaneous train rescheduling through cancelling, delaying and re-ordering policies: Three-phase solution method with guaranteed

## پیوست

### اثبات لم ۱:

از آنجایی که  $\partial_{p_R}^2 \pi_R = -2\beta_p$  منفی است، تابع سود طریقه حمل جاده‌ای  $\pi_R$  نسبت به  $p_R$  مقعر است. همچنین ماتریس هشین تابع سود طریقه حمل ترکیبی  $\pi_M$  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  $\pi_M$  نسبت به  $p_M$  و  $t_M$  مقعر است. □

### اثبات قضیه ۱:

با توجه به لم ۱، بهترین پاسخ<sup>۱</sup> 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  $(\partial_{p_R} \pi_R = 0)$ ،  $(\partial_{p_M} \pi_M = 0)$  و  $(\partial_{t_M} \pi_M = 0)$  مقادیر تعادلی قیمت‌های حمل و نقل هر دو طریقه و نیز زمان سفر طریقه حمل ترکیبی، یعنی معادلات **Error! Reference source not found.** تا (۸) به دست می‌آیند. با جایگزین نمودن این مقادیر در معادلات (۲)، (۳)، (۶) و (۷)، توابع تعادلی تقاضا و سود مطابق با معادلات (۹) تا (۱۲) به دست می‌آیند. □

### اثبات

$$\begin{cases} \max_{p_R} \pi_R(p_R) \\ \max_{p_M} \pi_M(p_M) \end{cases} \quad (16)$$

### 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  $p_M$  و  $p_R$  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  $(\partial_{p_R} \pi_R = 0)$ ،  $(\partial_{p_M} \pi_M = 0)$  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 (۵) و ساده‌سازی، تابع سود طریقه حمل ترکیبی  $\pi_M$  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:

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

<sup>۱</sup> Best Response

با جایگذاری این مقدار در مقادیر  $p_R^*$  و  $p_M^*$  و نیز در معادلات (۲)، (۳)، (۶) و (۷)، 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 (روابط (۱۳)، (۱۴)، (۲۴) و (۲۵)) 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. □