

## ارائه مدلی ریاضی برای قیمت گذاری سوخت با در نظر گرفتن تصمیمات طراحی شبکه زنجیره تأمین

امیرحسین صدیقی<sup>۱\*</sup>، علی نعیمی صدیقی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران (ایراندک)، تهران، ایران

Seddighi@irandoc.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران (ایراندک)، تهران، ایران

Naimi@irandoc.ac.ir

**چکیده:** قیمت گذاری سوخت یکی از موضوعات کلیدی در مدیریت مصرف انرژی است که نقش تعیین کننده ای در استفاده مناسب از منابع انرژی دارد. تصمیم گیری و سیاست گذاری صحیح در این حوزه می تواند علاوه بر مدیریت مصرف سوخت، از تغییرات شدید قیمتی در بازار انرژی نیز جلوگیری کند. عوامل مختلفی نظیر میزان تولیدات، میزان تقاضا، هزینه های تولید، انتقال و نگهداری، ساختار شبکه تأمین سوخت و رقابت بین خرده فروشان بر قیمت نهایی سوخت تأثیرگذارند. در این مقاله با در نظر گرفتن جنبه های مختلف مسئله، یک مدل ریاضی غیرخطی عدد صحیح مخلوط دو سطحی برای قیمت گذاری سوخت در شرایط رقابتی ارائه شده است. مدل پیشنهادی مبتنی بر یک بازی استکلبرگ - نش یک به چند است که در آن، در سطح اول (رهبر) یک مدیریت مرکزی قرار دارد که مسئول مکان یابی و برنامه ریزی پالایشگاه هاست و در سطح دوم (پیروان) خرده فروشانی قرار دارند که برای کسب سهم بیشتری از بازار سوخت، در حال رقابت با یکدیگرند. در نهایت رقابت بین قیمت های خرده فروشی، تقاضای مصرف سوخت را رقم خواهد زد. در ادامه، روش حل مسئله بیان می شود و نتایج عددی آن در دو حالت مدل غیرمتمرکز و مدل متمرکز مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. در انتها با استفاده از تحلیل حساسیت سعی می شود تا ضمن بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، پیام های مدیریتی مرتبط با مسئله مورد بحث نیز ارائه گردند.

**واژه های کلیدی:** زنجیره تأمین سوخت، قیمت گذاری سوخت، بازی استکلبرگ، بازی نش، طراحی زنجیره تأمین.

## ۱. مقدمه

بی‌شک یکی از منابع اصلی انرژی در حال حاضر، سوخت‌های فسیلی هستند. تأثیراتی که این ماده بر پیشرفت صنعتی در قرن اخیر داشته، انکارناپذیر است. وجود منابع محدود نفت خام از یک سو و نیاز روزافزون به فرآورده‌های نفتی از سوی دیگر، اهمیت مدیریت صحیح و علمی بر این منابع انرژی را بیش از پیش روشن می‌سازد.

در این راستا قیمت‌گذاری سوخت به‌عنوان یکی از موضوعات کلیدی در مدیریت مصرف انرژی، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در استفاده مناسب از منابع انرژی داشته باشد. در این بین عوامل مختلفی نظیر میزان تولیدات، میزان تقاضا، هزینه‌های تولید، انتقال و نگهداری، ساختار شبکه تأمین سوخت و رقابت بین خرده‌فروشان بر قیمت نهایی سوخت تأثیرگذارند. از این رو نیاز به مدلی که بتواند جنبه‌های مختلف این مسئله را در یک محیط رقابتی در نظر بگیرد، به شدت احساس می‌گردد.

در پاسخ به این نیاز و با نگاهی به ادبیات موضوع مشاهده می‌شود که حجم چشمگیری از مطالعات، معطوف به طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین انرژی در بخش‌های مختلف‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به زنجیره تأمین سوخت‌های فسیلی [۳-۱]، زنجیره تأمین برق [۴ و ۵]، زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی [۹-۶] و زنجیره تأمین هیدروژن [۱۰] اشاره کرد. از سوی دیگر، به تناسب حوزه‌های مختلف مورد اشاره، در امر قیمت‌گذاری انرژی نیز تحقیقات گوناگونی در ادبیات موضوع صورت گرفته است [۱۱-۱۵]. در ادامه، مرور کوتاهی بر مطالعات مرتبط با موضوع مدنظر این مقاله خواهیم داشت.

مرادی‌نسب و همکاران [۱۶] با در نظر گرفتن نقش دولت و بخش‌های خصوصی، یک مدل اقتصادی یکپارچه جهت برنامه‌ریزی انرژی برای سوخت‌های فسیلی ارائه می‌دهند. این مدل بر مبنای نظریه بازی‌ها تلاش دارد مقادیر بهینه برای نرخ تولید و قیمت محصولات را چه در بخش دولتی و چه در بخش خصوصی تعیین کند. در این راستا رقابت بین بخش‌های دولتی و خصوصی در دو حالت همکارانه و غیرهمکارانه (با استفاده از تعادلات نش و استکلبرگ<sup>۱</sup>) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت با استفاده از یک مثال عددی سعی شده است تا نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی مقایسه و تحلیل شوند. با اینکه این مطالعه توجه خود را بر روی بحث قیمت‌گذاری و روابط بین بخش دولتی و خصوصی متمرکز کرده، به تصمیمات طراحی شبکه در آن توجهی نشده و بیشتر بحث برنامه‌ریزی تولید جهت برآورده‌سازی تقاضا در آن مدنظر است.

تانگ و همکاران [۱۷] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای طراحی و برنامه‌ریزی بهینه زنجیره تأمین سوخت ارائه می‌دهند. در

این زنجیره تأمین، سوخت فسیلی با سوخت زیستی به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است و عدم قطعیت مربوط به تأمین سوخت زیستی، تقاضای سوخت و قیمت نفت خام در مدل‌بندی لحاظ شده‌اند. سپس مدل پیشنهادی در یک مطالعه موردی به کار گرفته شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سهم بازار سوخت‌های زیستی با افزایش قیمت نفت خام و بالا رفتن دسترسی به زیست‌توده به تدریج افزایش می‌یابد. با اینکه این مقاله تصمیمات مربوط به طراحی شبکه را در مدل خود لحاظ کرده، اما عملاً به بحث قیمت‌گذاری توجه چندانی نکرده است و فقط خود را محدود به تغییرات قیمت در نفت خام می‌نماید. لذا مسئله در محیطی فارغ از رقابت مورد بررسی قرار گرفته است.

پیتی و همکاران [۱۸] مدلی پویا برای زنجیره تأمین پالایشگاه ارائه می‌دهند که فعالیت‌های مختلفی نظیر تأمین نفت خام، انتقال، برنامه‌ریزی تولید و مدیریت عملیات را در بر می‌گیرد. به‌علاوه، تغییرات تصادفی در انتقال، خروجی، قیمت و مشکلات عملیاتی نیز در این مدل لحاظ شده‌اند. سپس مدل پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی در چندین مطالعه موردی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

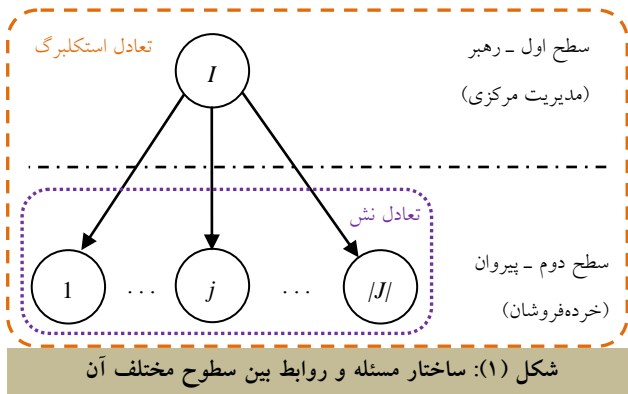
فیورنسیو و همکاران [۱۹] سیستمی تصمیم‌یار مبتنی بر یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مخلوط پیشنهاد می‌دهند که امکان ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های مختلف در شبکه پایین‌دستی سوخت را فراهم می‌آورد. هر چند که این مطالعه جنبه‌های طراحی زنجیره تأمین را در نظر گرفته، از حیث قیمت‌گذاری دارای کاستی است.

نعیمی صدیق و همکاران [۲۰] یک زنجیره تأمین دو سطحی فروشنده - خریدار را با استفاده از یک رویکرد پیوسته و مبتنی بر نظریه بازی مدل می‌نمایند. در این مطالعه از بازی استکلبرگ برای قیمت‌گذاری بهره گرفته شده است. در مطالعه دیگری نعیمی صدیق و همکاران [۲۱] رابطه بین سطوح مختلف زنجیره تأمین را در یک محیط رقابتی بر مبنای یک بازی نش غیرهمکارانه مورد بررسی قرار می‌دهند. در این راستا از نظریه بازی برای هماهنگ کردن اعضای زنجیره و با تکیه بر تصمیمات قیمت‌گذاری، مدیریت موجودی و سفارش‌دهی بهره گرفته شده است.

فرناندز و همکاران [۲۲] با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مخلوط مدلی چندلایه‌ای، چندعاملی و چندمحصولی برای طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین سوخت در شرایط قطعی و با در نظر گرفتن تصمیمات مکان‌یابی، ظرفیت و انتقال ارائه می‌دهند. مدل پیشنهادی با استفاده از یک مطالعه موردی واقعی در کشور پرتغال مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن بحث و بررسی شده است.

الیوبرا و هاماجر [۲۳] مسئله سرمایه‌گذاری بهینه در زیرساخت‌های لجستیکی به‌منظور توزیع محصولات پتروشیمی را تحت شرایط عدم





دیگر مفروضات مسئله به شرح زیرند:

- تمامی پارامترهای مسئله قطعی هستند.
- تقاضای بالقوه بازار مقداری ثابت و مشخص است.
- تقاضا به صورت خطی با قیمت در ارتباط است.
- ظرفیت تولید هر پالایشگاه میزان محدود و مشخصی است.
- در هر مکان بالقوه می‌توان فقط یک پالایشگاه را و با یک نوع ظرفیت تولید مشخص احداث نمود.
- کمبود سوخت در مسئله مجاز نیست.

### ۳. مدل ریاضی

در این بخش، ابتدا پارامترها و متغیرهای مورد استفاده تعریف و سپس مدل ریاضی پیشنهادی مسئله ارائه شده است. در ادامه و به منظور مقایسه‌های آتی، مدلی متمرکز از مسئله نیز بیان خواهد شد.

جداول (۲) تا (۵) به ترتیب مجموعه‌ها، پارامترهای مسئله و در نهایت متغیرهای تصمیم سطح اول و دوم مورد استفاده را نشان می‌دهند.

جدول (۲): مجموعه‌ها

$I$	مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث پالایشگاه‌ها
$C$	مجموعه سطوح ظرفیت برای پالایشگاه‌ها
$J$	مجموعه خرده‌فروشان

جدول (۳): پارامترها

$f_{i,c}$	هزینه احداث پالایشگاه در مکان بالقوه $i$ و با سطح ظرفیت $c$
$pr_i$	هزینه تولید سوخت در پالایشگاه $i$
$h_i$	هزینه نگهداری سوخت در پالایشگاه $i$
$tr_{i,j}$	هزینه انتقال سوخت از پالایشگاه $i$ به خرده‌فروش $j$
$cap_c$	ظرفیت در دسترس پالایشگاه در سطح $c$
$\alpha_j$	ضریب کششی تقاضا نسبت به قیمت خرده‌فروش $j$
$\beta_j$	ضریب کششی تقاضا نسبت به قیمت خرده‌فروش رقیب برای خرده‌فروش $j$
$d_0$	تقاضای بالقوه بازار

با توجه به شکاف مطالعاتی موجود در ادبیات، در این مقاله قصد داریم با کمک مدل‌سازی ریاضی و با استفاده از نظریه بازی‌ها، مدلی برای قیمت‌گذاری سوخت با در نظر گرفتن تصمیمات طراحی زنجیره تأمین آن ارائه دهیم. در این راستا ابتدا در فصل دوم به بیان دقیق مسئله و مفروضات مربوط به آن خواهیم پرداخت. سپس در فصل سوم مدل‌بندی ریاضی مسئله در قالب یک برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی عدد صحیح مخلوط دو سطحی ارائه خواهد شد. روش حل مسئله در فصل چهارم مورد بحث قرار خواهد گرفت. فصل پنجم نتایج عددی مربوط به مسئله مدنظر را در دو حالت مدل غیرمتمرکز و مدل متمرکز نشان خواهد داد. در فصل ششم به تحلیل حساسیت پارامترهای مدل و بحث درباره یافته‌های تحقیق خواهد پرداخت. در نهایت، مقاله در فصل آخر جمع‌بندی می‌شود.

### ۲. بیان مسئله

در این بخش به بیان مسئله و فرضیات مربوط به آن خواهیم پرداخت. زنجیره تأمین سوخت در نظر گرفته شده در این مقاله متشکل از سه سطح تولیدکنندگان، خرده‌فروشان و مشتریان است. در سطح تولیدکنندگان به دنبال مکان‌یابی پالایشگاه‌های نفت خام و تعیین برنامه تولید هریک از آن‌ها برای فراهم آوردن سوخت مورد نیاز خرده‌فروشان هستیم. نیاز خرده‌فروشان نیز بر حسب تقاضای بالقوه بازار و قیمت‌هایی تعیین می‌شود که هریک از خرده‌فروشان باید در یک فضای رقابتی با دیگر خرده‌فروشان پیشنهاد دهند.

فرض می‌شود که یک مدیریت مرکزی مسئول مکان‌یابی و ساخت پالایشگاه‌ها و برنامه‌ریزی آن‌ها برای تولید، نگهداری و انتقال سوخت مورد نیاز خرده‌فروشان است. هدف مدیریت مرکزی در کنار مدیریت هزینه‌های مربوط، تعیین بهینه قیمت عمده‌فروشی برای عرضه سوخت به هریک از خرده‌فروشان است؛ به نحوی که مجموع سود نهایی خود را ماکزیم نماید. لذا این سطح از زنجیره با توجه به نقش و جایگاه آن نسبت به سایر اعضای زنجیره تأمین به‌عنوان رهبر در بازی استکلبرگ در نظر گرفته می‌شود [۲۷].

در سطح بعدی، خرده‌فروشان قرار دارند که متأثر از تصمیمات رهبر بوده و باید به رقابت با یکدیگر پردازند تا سهم بیشتری از بازار را نصیب خود کنند. این سطح از زنجیره تأمین بیانگر یک بازی نش غیرهمکارانه در یک محیط رقابتی است [۲۸]. بدین ترتیب مسئله به صورت یک مدل دو سطحی رهبر - پیروان (بازی استکلبرگ - نش یک به چند) در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱) ساختار مسئله و روابط بین اجزای مختلف زنجیره تأمین سوخت مدنظر را نشان می‌دهد. در این شکل  $I$  و  $J$  به ترتیب مجموعه پالایشگاه‌ها و خرده‌فروشان هستند.

جدول (۴): متغیرهای تصمیم سطح اول	
$X_{i,c}$	یک متغیر دوتایی <sup>۱</sup> که اگر پالایشگاه در مکان بالقوه $i$ و با سطح ظرفیت $c$ احداث شود برابر با یک می‌گردد.
$Q_{i,j}$	میزان انتقال سوخت از پالایشگاه $i$ به خرده‌فروش $j$
$W_j$	قیمت عمده‌فروشی سوخت به خرده‌فروش $j$

جدول (۵): متغیرهای تصمیم سطح دوم	
$p_j$	قیمت پیشنهادی خرده‌فروش $j$
$d_j$	تقاضای خرده‌فروش $j$

گفتنی است که در سرتاسر این مقاله بردارهای متناظر با پارامترها و متغیرهای تصمیم به صورت درشت (bold) نشان داده شده‌اند.

### ۱.۳. مدل غیر متمرکز

با توجه به آنچه در بخش قبل بیان شد، مسئله مدنظر در قالب یک مدل غیرخطی عدد صحیح مخلوط دوسطحی<sup>۲</sup> ارائه می‌شود. مسئله سطح اول بیانگر تصمیمات مربوط به طراحی و برنامه‌ریزی شبکه زنجیره تأمین سوخت می‌باشد و عبارت است از:

$$\max F(\mathbf{X}, \mathbf{Q}, \mathbf{W}) = \sum_{j \in J} W_j d_j - \left[ \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} f_{i,c} X_{i,c} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (pr_i + h_i + tr_{i,j}) Q_{i,j} \right] \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{c \in C} X_{i,c} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} Q_{i,j} \leq \sum_{c \in C} cap_c X_{i,c} \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} Q_{i,j} = d_j \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$X_{i,c} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall c \in C \quad (5)$$

$$Q_{i,j} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (6)$$

$$W_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (7)$$

تابع هدف (۱) به دنبال بیشینه‌سازی سود مدیریت مرکزی پالایشگاه‌ها می‌باشد که برابر است با درآمد ناشی از فروش سوخت به قیمت عمده‌فروشی منهای هزینه‌های مربوط به احداث پالایشگاه‌ها از یک سو و هزینه‌های عملیاتی همچون هزینه تولید، نگهداری و انتقال سوخت از هر پالایشگاه به نقاط تقاضا از سوی دیگر.

محدودیت (۲) نشان می‌دهد که در هر مکان بالقوه حداکثر مجاز به احداث یک پالایشگاه با یک سطح ظرفیت مشخص هستیم. محدودیت (۳) میزان سوخت ارسالی از هر پالایشگاه را محدود به ظرفیت در دسترس آن پالایشگاه می‌کند. محدودیت (۴) اطمینان می‌دهد که تمام تقاضای مورد نیاز خرده‌فروشان تأمین خواهد شد. محدودیت (۵) بیان می‌کند که متغیرهای تصمیم مربوط به مکان‌یابی پالایشگاه‌ها از نوع باینری هستند. محدودیت‌های (۶) و (۷) نیز به ترتیب تضمین می‌کنند که میزان سوخت انتقالی و قیمت عمده‌فروشی سوخت نامنفی هستند.

در مدل سطح اول فوق بردار تقاضای  $\mathbf{d}$  به طور ضمنی به قیمت عمده‌فروشی  $\mathbf{W}$  وابسته بوده و از حل مسئله سطح دوم به دست می‌آید. مسئله سطح دوم بیانگر رقابت بین خرده‌فروشان برای تعیین قیمت خرده‌فروشی است. این رقابت در قالب بازی  $G(J, \mathbf{S}, \mathbf{U})$  نشان داده می‌شود که در آن  $\mathbf{S} = (S_1, \dots, S_j, \dots, S_{|J|})$  مجموعه فضای استراتژی‌ها و  $S_j$  معرف فضای متناظر با استراتژی‌های قیمتی خرده‌فروش  $j$  است. از طرف دیگر  $\mathbf{U} = (\pi_1, \dots, \pi_j, \dots, \pi_{|J|})$  مجموعه توابع مطلوبیت و  $\pi_j$  تابع سود خرده‌فروش  $j$  می‌باشد.

هر خرده‌فروش به دنبال انتخاب بهترین استراتژی برای قیمت‌گذاری است؛ به نحوی که سود خود را حداکثر نماید. از آنجا که هر یک از خرده‌فروشان فقط به دنبال سود خود هستند و نسبت به یکدیگر برتری خاصی ندارند، می‌بایست استراتژی‌های خود را به طور همزمان تعیین کنند. نقطه‌ای که در آن تمامی خرده‌فروشان بهترین استراتژی خود را نسبت به دیگر بازیگران به صورت همزمان انتخاب می‌کنند، بیانگر نقطه تعادل نش<sup>۳</sup> بازی  $G(J, \mathbf{S}, \mathbf{U})$  می‌باشد. به عبارت دیگر، نقطه تعادل نش نقطه‌ای است که خرده‌فروشان در آن نقطه به استراتژی قیمتی خود رضایت می‌دهند. مسئله بهینه‌سازی متناظر با خرده‌فروش  $j$  در سطح دوم عبارت است از:

$$\max \pi_j = d_j (p_j - W_j) \quad (8)$$

s.t.

$$d_j = d_0 - \alpha_j p_j + \sum_{k \in J \setminus \{j\}} \beta_k p_k \quad (9)$$

$$p_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (10)$$

تابع هدف (۸) به دنبال بیشینه‌سازی سود خرده‌فروش  $j$  است که عبارت است از درآمد حاصل از فروش سوخت منهای هزینه خرید سوخت به قیمت عمده‌فروشی.

محدودیت (۹) رابطه تعادل بین تقاضا و قیمت‌های پیشنهادی خرده‌فروشان را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۰) الزام می‌کند که قیمت خرده‌فروشی غیرمنفی باشد.

### ۲.۳. مدل متمرکز

حال با توجه به اینکه تابع هدف مسئله فوق که بیشینه سازی است نسبت به قیمت خرده فروشی  $p_j$  مقعر می باشد، جواب بهینه آن با استفاده از مشتق گیری نسبت به این متغیر قابل محاسبه است. لذا دستگاه معادلات مدنظر به صورت زیر درمی آید.

$$\frac{\partial \pi_j}{\partial p_j} = d_0 - 2\alpha_j p_j + \sum_{k \in J \setminus \{j\}} \beta_k p_k + W_j \alpha_j = 0 \quad \forall j \in J \quad (14)$$

با جایگذاری عبارت فوق در مدل غیرمتمرکز پیشنهادی، مسئله به یک مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مخلوط تک سطحی تبدیل خواهد شد. پس داریم:

$$\max F(\mathbf{X}, \mathbf{Q}, \mathbf{W}, \mathbf{p}) = \sum_{j \in J} W_j (d_0 - \alpha_j p_j + \sum_{k \in J \setminus \{j\}} \beta_k p_k) - \left[ \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} f_{i,c} X_{i,c} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (tr_{i,j} + pr_i + h_i) Q_{i,j} \right] \quad (15)$$

s.t.

$$\sum_{i \in I} Q_{i,j} = d_0 - \alpha_j p_j + \sum_{k \in J \setminus \{j\}} \beta_k p_k \quad \forall j \in J \quad (16)$$

$$d_0 - 2\alpha_j p_j + \sum_{k \in J \setminus \{j\}} \beta_k p_k + W_j \alpha_j = 0 \quad \forall j \in J \quad (17)$$

(۲)، (۳)، (۵-۷)، (۱۰)

حال می توان مدل های پیشنهادی را با استفاده از نرم افزارهای تجاری در دسترس حل نمود.

### ۵. نتایج عددی

در این بخش برای تحلیل مدل پیشنهادی از یک مثال عددی کمک خواهیم گرفت. بدین منظور یک مربع ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ را به عنوان منطقه تحت مطالعه در نظر می گیریم. سپس با استفاده از توزیع یکنواخت، ۵ مکان بالقوه برای پالایشگاه ها و همچنین ۴ مکان برای خرده فروش ها را به صورت تصادفی در منطقه مدنظر انتخاب می نماییم. فاصله بین پالایشگاه  $i$  و خرده فروشی  $j$  را به کمک فاصله اقلیدسی<sup>۲</sup> محاسبه کرده و در پارامتر  $dis_{i,j}$  نگهداری می نماییم. سه سطح ظرفیت در دسترس برای هر پالایشگاه در نظر می گیریم. سایر پارامترهای مسئله مطابق جدول (۶) تولید می گردند که در آن  $U(a,b)$  نشانگر توزیع پیوسته یکنواخت<sup>۳</sup> در بازه  $(a,b)$  است.

برای حل مسئله، ابتدا مدل های پیشنهادی در نرم افزار GAMS پیاده سازی شدند و سپس از حل کننده BARON برای یافتن جواب بهینه کمک گرفته شد. به علاوه، محاسبات با استفاده از یک کامپیوتر با

در این بخش، ساختار مسئله را به صورت متمرکز در نظر می گیریم. به عبارت دیگر در مدل جدید، رابطه بین مدیریت مرکزی و خرده فروشان از نوع رهبر- پیروان نبوده، بلکه نوعی همکاری بین آن ها وجود خواهد داشت و زنجیره تأمین در عین حفظ رقابت در سطح خرده فروشان به صورت یک کل واحد در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب مسئله در قالب یک مدل غیرخطی عدد صحیح مخلوط تک سطحی<sup>۱</sup> و به صورت زیر فرمول بندی می گردد.

$$\max Z(\mathbf{X}, \mathbf{Q}, \mathbf{p}) = \sum_{j \in J} p_j d_j - \left[ \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} f_{i,c} X_{i,c} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (pr_i + h_i + tr_{i,j}) Q_{i,j} \right] \quad (11)$$

s.t.

$$d_j = d_0 - \alpha_j p_j + \sum_{k \in J \setminus \{j\}} \beta_k p_k \quad \forall j \in J \quad (12)$$

(۲-۶)، (۱۰)

تابع هدف (۱۱) به دنبال بیشینه سازی سود کل زنجیره تأمین می باشد که عبارت است از درآمد ناشی از فروش سوخت در نقاط تقاضا منهای مجموع کل هزینه ها شامل هزینه احداث پالایشگاه ها، هزینه های تولید، نگهداری و انتقال سوخت. محدودیت (۱۲) رابطه بین قیمت و تقاضا را در تمامی خرده فروشان نشان می دهد.

### ۴. روش حل

حل مدل غیرمتمرکز پیشنهادی نیازمند به دست آوردن نقطه تعادل نش بازی  $G(J, \mathbf{S}, \mathbf{U})$  می باشد. بدین منظور باید مسائل بهینه سازی متناظر با هریک از خرده فروشان را به طور همزمان حل کنیم. این امر منجر به دستگاهی از معادلات می شود که معادله  $J$ ام آن متناظر با جواب بهینه مسئله (۸-۱۰) است. جواب بهینه این مسئله به صورت زیر قابل محاسبه است. ابتدا با بازنویسی تابع هدف (۸) و با استفاده از محدودیت (۹)، مسئله مربوط به خرده فروش  $J$  را به یک مسئله بهینه سازی بدون محدودیت تبدیل می کنیم. داریم:

$$\max \pi_j = d_j (p_j - W_j) = (d_0 - \alpha_j p_j + \sum_{k \in J \setminus \{j\}} \beta_k p_k) (p_j - W_j) \quad (13)$$

s.t.

(۱۰)

پردازنده ۴ هسته‌ای با سرعت پردازش ۳/۳ گیگاهرتز و ۴ گیگابایت رم انجام شد. شایان ذکر است که حل‌کننده مورد اشاره، به‌طور خاص قابلیت حل بهینه مسائل غیرخطی عدد صحیح مخلوط را دارد.

جدول (۶): پارامترها

$$f_{i,c} = U(10,30) \times cap_c$$

$$tr_{i,j} = U(0.001,0.004) \times dis_{i,j}$$

$$pr_i = U(7.5,8.5)$$

$$h_i = U(0.75,0.85)$$

$$cap_c = [150,250,500]$$

$$\alpha_j = U(3,4)$$

$$\beta_j = U(0.02,0.03)$$

$$d_0 = 1000$$

جدول (۷) جواب بهینه مربوط به مدل‌های غیرمتمرکز و متمرکز

پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول (۷): جواب بهینه مسئله

مدل متمرکز		مدل غیرمتمرکز	
۱۶۱/۸۸	قیمت	۲۲۸/۱۷	قیمت
۴۵۰	تقاضا	۲۲۵	تقاضا
۲۴۰۰۸۸۷	سود	۱۶۳/۳۴	قیمت عمده‌فروشی
		۱۲۲۴۹۲/۸	سود رهبر
		۱۴۵۹۹/۶۵	سود خرده‌فروش

در حالت بهینه در مدل غیرمتمرکز تنها ۳ پالایشگاه احداث می‌گردد که حجم سوختی بالغ بر ۱۴۷/۲۲ واحد را به‌طور متوسط به نقاط تقاضا انتقال می‌دهند. این در حالی است که در مدل متمرکز در هر ۵ مکان بالقوه پالایشگاه احداث می‌شود و حجم سوخت انتقالی به‌طور متوسط ۲۱۰ واحد است.

لازم به ذکر است که تمامی نتایج عددی گزارش شده در این مقاله به‌صورت میانگین محاسبه شده‌اند. به‌عنوان مثال منظور از قیمت خرده‌فروشی، میانگین قیمت خرده‌فروشی بهینه برای تمامی خرده‌فروشان است.

## ۶. تحلیل حساسیت

در این بخش قصد داریم تا تأثیر تغییر در پارامترهای مختلف مسئله را بر روی شاخص‌های گوناگون مورد بررسی قرار دهیم.

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد با افزایش میزان تقاضای بالقوه در بازار ( $d_0$ ) قیمت سوخت افزایش می‌یابد و با توجه

به افزایش تقاضا، میزان سود به مراتب بیشتر می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در بازارهای با تقاضای بالقوه بیشتر، سود بیشتری نصیب خرده‌فروشان (پیروان) و مدیریت مرکزی پالایشگاه‌ها (رهبر) خواهد شد. همچنین تفاوت معناداری در افزایش سود بین مدل‌های غیرمتمرکز و متمرکز وجود ندارد. با فرض اینکه مدیریت مرکزی پالایشگاه‌ها بر عهده دولت باشد و خرده‌فروشان به دلیل فضای رقابتی موجود بین آن‌ها بخش خصوصی تلقی گردند، با افزایش تقاضای مشتریان، سود بیشتری نصیب هر دو بخش دولتی و خصوصی می‌گردد.

با توجه به شکل (۳) که بیانگر رقابتی‌تر شدن بازار سوخت است با افزایش  $\alpha_j$  در هر دو مدل غیرمتمرکز و متمرکز، قیمت به شدت کاهش پیدا می‌کند، البته تقاضا کاهش ناچیزی دارد. بنابراین میزان سود کاهش خواهد یافت. همان‌طور که مشاهده می‌گردد رقابتی‌تر کردن بازار تأثیر چندانی در میزان تقاضا ندارد. بنابراین بازار رقابتی باعث کاهش قیمت خرده‌فروشی (مصرف‌کننده) می‌گردد. به عبارت دیگر در این حالت دولت با رقابتی‌تر کردن فضای بازار سوخت می‌تواند ضمن برآورده نمودن تقاضای مشتریان، قیمت مصرف‌کننده را کاهش دهد. افزون بر این، بخش خصوصی نسبت به دولت تغییرات سود بیشتری دارد.

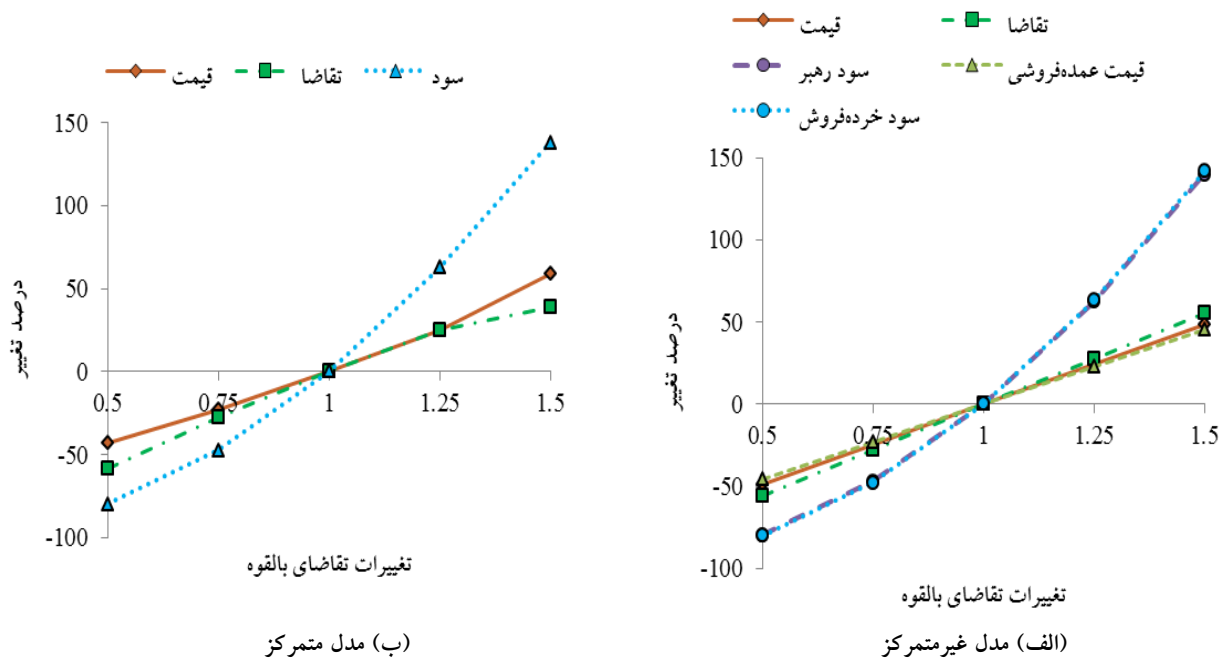
در شکل (۴) افزایش هزینه احداث پالایشگاه، کاهش سود مدیریت مرکزی پالایشگاه‌ها را در پی دارد. در زنجیره تأمین غیرمتمرکز افزایش هزینه احداث تأثیر چندانی بر قیمت خرده‌فروشی ندارد ولی در مدل زنجیره تأمین متمرکز تا حدودی منجر به افزایش قیمت خرده‌فروشی می‌گردد که این افزایش با ۱/۵ برابر شدن هزینه احداث پالایشگاه حداکثر ۴ درصد است. همچنین رفتار تقاضا در هر دو مدل عکس قیمت خرده‌فروشی خواهد بود. جالب توجه است که افزایش ۵۰ درصدی هزینه احداث پالایشگاه، بیشینه ۸ درصد از سود زنجیره تأمین می‌کاهد که این امر به دلیل کاهش تعداد احداث پالایشگاه است. افزون بر این سود خرده‌فروشان با افزایش هزینه‌های احداث کاهش ناچیزی دارد. در نتیجه با افزایش هزینه‌های دولتی احداث پالایشگاه، هم بخش خصوصی و هم دولت متضرر می‌شوند و قیمت نهایی مصرف‌کننده زیاد خواهد شد. بنابراین در این حالت تمام اعضای زنجیره شامل دولت، بخش خصوصی و مردم زیان می‌بینند.

شکل (۵) بیانگر رقابت تعداد خرده‌فروش بیشتر در کسب سهم بیشتری از تقاضای بالقوه سوخت است. با افزایش تعداد خرده‌فروشان میزان تغییرات تقاضا و قیمت در سطح عمده‌فروشی و خرده‌فروشی ناچیز خواهد بود. ولی با توجه به افزایش تعداد خرده‌فروشان، میزان

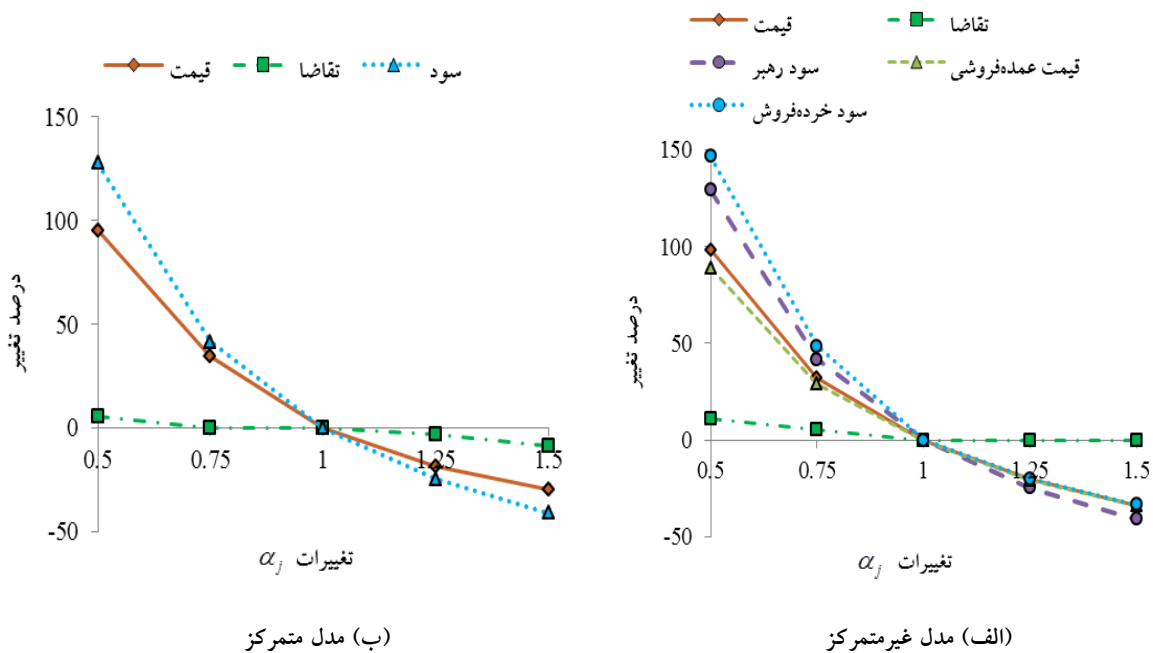


فضای رقابتی بین خرده‌فروشان از حالت انحصار به انحصار چندگانه و رقابت کامل میل کند، با حفظ میزان تقاضا و قیمت خرده‌فروشی، دولت افزایش سود قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت، ضمن اینکه سود بخش خصوصی نیز افزایش نسبی می‌یابد.

تقاضای نهایی مدیریت مرکزی پالایشگاه‌ها در هر دو مدل متمرکز و غیرمتمرکز افزایش چشمگیری خواهد یافت، که این افزایش منجر به سود ۶۰ درصدی مدیریت مرکزی پالایشگاه‌ها خواهد شد. بنابراین برای مدیریت مرکزی پالایشگاه‌ها تعداد خرده‌فروشان بیشتری توصیه می‌شود که این مهم می‌تواند در جهت سیاست‌های کلان‌کشور در صنعت سوخت مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت در این حالت هر چقدر

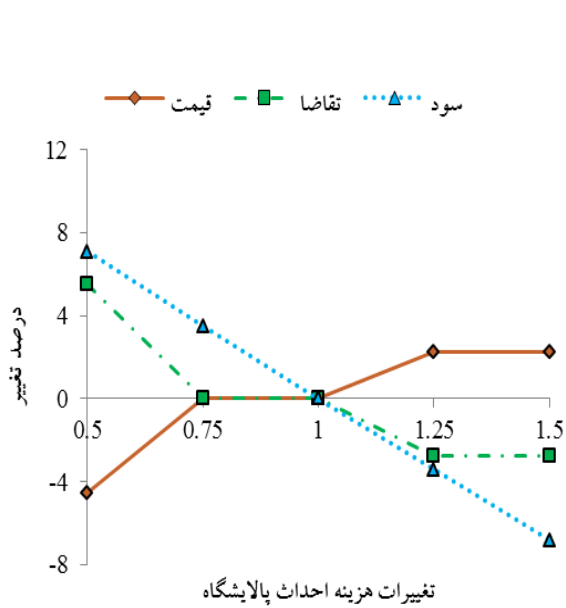


شکل (۲): تأثیر تغییر در تقاضای بالقوه بازار بر حسب شاخص‌های مختلف

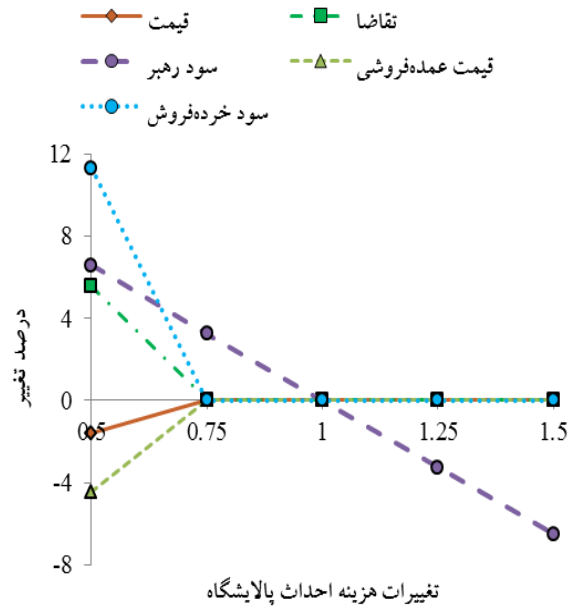


شکل (۳): تأثیر تغییر در ضریب کششی تقاضا نسبت به قیمت خرده‌فروشی بر حسب شاخص‌های مختلف



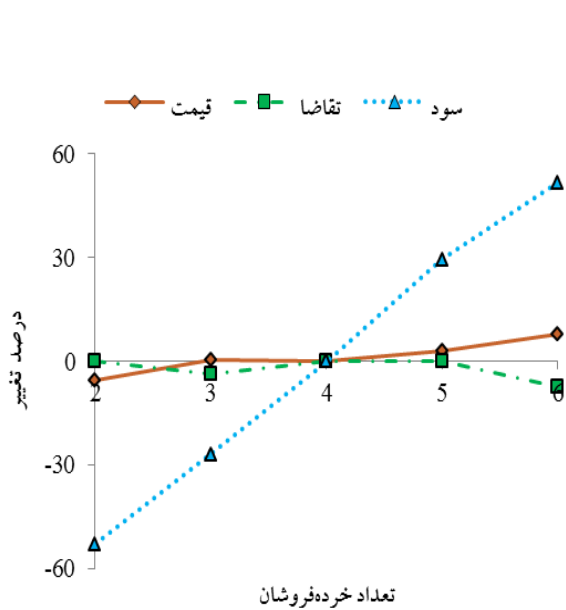


(ب) مدل متمرکز

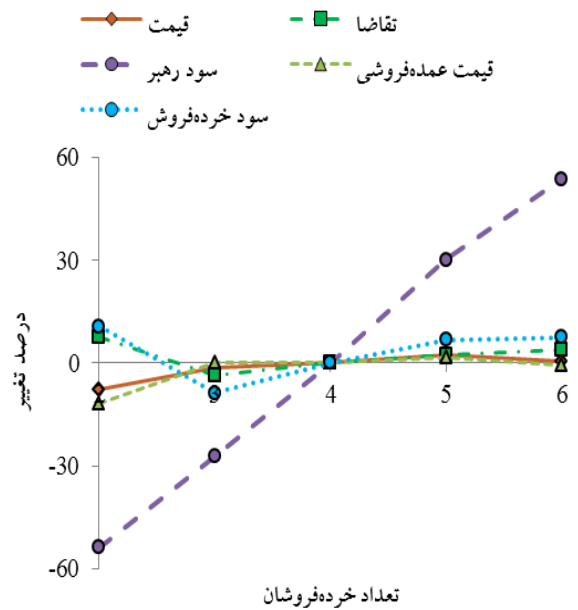


(الف) مدل غیرمتمرکز

شکل (۴): تأثیر تغییر در هزینه واحدها پالایشگاه بر حسب شاخص‌های مختلف



(ب) مدل متمرکز



(الف) مدل غیرمتمرکز

شکل (۵): تأثیر تغییر در تعداد خرده‌فروشان با ثابت ماندن تقاضای بالقوه بازار

شکل (۶) نشانگر بزرگ‌تر شدن بازار برای فعالیت خرده‌فروشان بیشتر است. در این شکل با افزایش تعداد خرده‌فروشان، متوسط تقاضای خرده‌فروشان افزایش نسبی خواهد داشت که این امر بدان دلیل است که تقاضای بالقوه با افزایش تعداد خرده‌فروشان افزایش می‌یابد. همچنین

قیمت خرده‌فروشی و عمده‌فروشی نیز بیشینه تا ۱/۵ برابر افزایش خواهند یافت. این افزایش تعداد خرده‌فروشان، سود مدیریت مرکزی پالایشگاه‌ها را بیش از سه برابر خواهد کرد که این امر به دلیل افزایش حجم بازار و رقابت است. همچنین در این حالت متوسط سود

پالایشگاه‌های کمتری دارد. با این حال، متوسط قیمت خرده‌فروشی در حالت غیرمتمرکز به‌طور معناداری بیش از مقدار متناظر آن در حالت متمرکز است و به تبع آن باعث کاهش متوسط تقاضای بازار شده است. این امر می‌تواند در تعیین سیاست‌های مدیریت مصرف سوخت تأثیرگذار باشد.

بر پایه نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای مسئله، مشاهده می‌گردد که در بازارهای با تقاضای بالقوه بیشتر، سود بیشتری نصیب سطوح مختلف زنجیره تأمین خواهد شد. از طرف دیگر افزایش رقابت در بازار باعث کاهش قیمت خرده‌فروشی می‌شود. در نهایت با افزایش همزمان حجم بازار و تعداد خرده‌فروشان، شاهد افزایش متوسط قیمت عمده‌فروشی و خرده‌فروشی خواهیم بود.

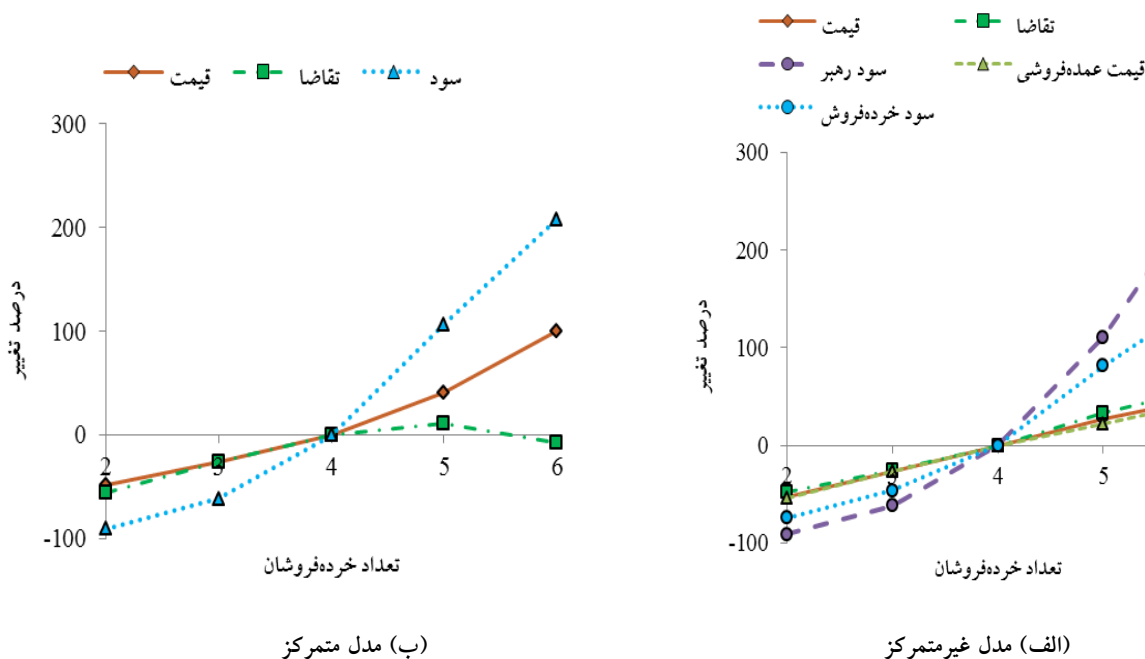
در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا افزون بر وابستگی به قیمت، چند دوره‌ای نمودن مسئله، کانال مستقیم خرید از پالایشگاه‌ها توسط کارخانه‌ها به‌عنوان ماده اولیه تولید محصول، و سیاست‌های کاهش تقاضای مصرف‌کننده در جهت مدیریت مصرف انرژی می‌توانند موضوعات مناسبی برای مطالعات آتی باشند.

خرده‌فروشان نیز تا ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد. در این حالت که حالت توسعه‌یافته‌ای نسبت به حالت قبل (به دلیل افزایش حجم بازار و رقابت) است، سود بخش خصوصی نیز افزایش چشم‌گیری خواهد داشت.

## ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی ریاضی مبتنی بر نظریه بازی برای قیمت‌گذاری سوخت با مدنظر قرار دادن تصمیمات طراحی و برنامه‌ریزی شبکه زنجیره تأمین آن ارائه شد. در این راستا مسئله در دو حالت غیرمتمرکز و متمرکز بررسی گردید. در حالت غیرمتمرکز، مسئله با استفاده از یک بازی استکلبرگ - نش یک به چند بین مدیریت مرکزی پالایشگاه‌ها در سطح اول و مجموعه خرده‌فروشان در سطح دوم مدل‌سازی شد. در حالت متمرکز، نوعی همکاری عمودی بین دو سطح مورد اشاره در زنجیره تأمین سوخت مدنظر قرار گرفت و در عین حال، رقابت افقی در سطح خرده‌فروشان زنجیره تأمین نیز حفظ شد.

در ادامه و با کمک نتایج محاسباتی سعی شد تا ابعاد مختلف هر یک از این رویکردها روشن گردد. بنا بر این نتایج دیده می‌شود که نوعاً مدل غیرمتمرکز در مقایسه با مدل متمرکز تمایل به احداث تعداد



شکل (۶): تأثیر تغییر در تعداد خرده‌فروشان با افزایش متناسب تقاضای بالقوه بازار

## مراجع

[۱] بهشتی‌نیا، محمدعلی، خطیبی، سید امیر محمد، «تحلیل سه سناریوی مختلف در بهینه‌سازی مصرف انرژی و زمان‌بندی در زنجیره تأمین»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۷، شماره ۱، صفحه ۳۶-۴۷، ۱۳۹۶.

[2] Azadeh, A., Shafiee, F., Yazdanparast, R., Heydari, J., Mohammadi Fathabad, A., "Evolutionary Multi-Objective Optimization of Environmental Indicators of Integrated Crude Oil Supply Chain under Uncertainty", Journal of Cleaner Production, Vol. 152, No. 1, pp. 295-311, 2017.

- [3] Rafique, R., Mun, K. G., Zhao, Y., *Designing Energy Supply Chains: Dynamic Models for Energy Security and Economic Prosperity*", Production and Operations Management Society, Vol. 26, No. 6, pp. 1120-1141, 2017.
- [4] Seddighi, A. H., Ahmadi-Javid, A., "Integrated Multiperiod Power Generation and Transmission Expansion Planning with Sustainability Aspects in a Stochastic Environment", *Energy*, Vol. 86, No. 1, pp. 9-18, 2015.
- [5] Seddighi, A. H., Ahmadi-Javid, A., "A Sustainable Risk-Averse Approach to Power Generation Planning with Disruption Risk and Social Responsibility Considerations", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 105, No. 1, pp. 116-133, 2015.
- [6] Babazadeh, R., Razmi, J., Rabbani, M., Pishvae, M. S., "An Integrated Data Envelopment Analysis-Mathematical Programming Approach to Strategic Biodiesel Supply Chain Network Design Problem", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 147, No. 1, pp. 694-707, 2017.
- [7] Castillo-Villar, K. K., Eksioğlu, S., Taherkhorsandi, M., "Integrating Biomass Quality Variability in Stochastic Supply Chain Modeling and Optimization for Large-Scale Biofuel Production", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 149, No. 1, pp. 904-918, 2017.
- [8] Ghaderi, H., Pishvae, M. S., Moini, A., "Biomass Supply Chain Network Design: An Optimization-Oriented Review and Analysis", *Industrial Crops and Products*, Vol. 94, No. 1, pp. 972-1000, 2016.
- [9] Santibañez-Aguilar, J. E., Morales-Rodriguez, R., González-Campos, J. B., Ponce-Ortega, J. M., "Stochastic Design of Biorefinery Supply Chains Considering Economic and Environmental Objectives", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 136, No. 1, pp. 224-245, 2016.
- [10] Almansoori, A., Betancourt-Torcat, A., "Design of Optimization Model for a Hydrogen Supply Chain under Emission Constraints - A Case Study of Germany", *Energy*, Vol. 111, No. 1, pp. 414-429, 2016.
- [۱۱] پورکاظمی، محمدحسین، نادری، رسول، حاتمى، مهدى، «قیمت‌گذاری گاز طبیعى ایران در بخش صنعت با استفاده از مدل رمزی و روش تخمین رگرسیون فازی»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۵۲-۶۹، ۱۳۹۵.
- [12] Gupta, N., Luttrell, G., Noble, A., "Coal Micro-Pricing: Optimizing the Coal Fuel Supply Chain for Indian Thermal Power Plants", *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2017, DOI: 10.1080/19392699.2016.1277211
- [13] Soares, J., Fotouhi Ghazvini, M. A., Borges, N., Vale, Z., "Dynamic Electricity Pricing for Electric Vehicles using Stochastic Programming", *Energy*, Vol. 122, No. 1, pp. 111-127, 2017.
- [14] Liu, M.-H., Margaritis, D., Zhang, Y., "Competition and Petrol Pricing in the Smartphone Era: Evidence from Singapore", *Economic Modelling*, Vol. 53, No. 1, pp. 144-155, 2016.
- [15] Neto, P. A., Friesz, T. L., Han, K., "Electric Power Network Oligopoly as a Dynamic Stackelberg Game", *Networks and Spatial Economics*, Vol. 16, No. 4, pp. 1211-1241, 2016.
- [16] Moradi Nasab, N., Amin-Naseri, M. R., Jafari Behbahani, T., Nakhai Kamal Abadi, I., "An Integrated Economic Model of Fossil Fuel Energy Planning for Government and Private Sectors", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, Vol. 11, No. 7, pp. 651-664, 2016.
- [17] Tong, K., Gong, J., Yue, D., You, F., "Stochastic Programming Approach to Optimal Design and Operations of Integrated Hydrocarbon Biofuel and Petroleum Supply Chains", *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 49-61, 2014.
- [18] Pitty, S. S., Li, W., Adhitya, A., Srinivasan, R., Karimi, I. A., "Decision Support for Integrated Refinery Supply Chains: Part 1. Dynamic Simulation", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 32, No. 11, pp. 2767-2786, 2008.
- [19] Fiorencio, L., Oliveira, F., Nunes, P., Hamacher, S., "Investment Planning in the Petroleum Downstream Infrastructure", *International Transactions in Operational Research*, Vol. 22, No. 2, pp. 339-362, 2015.
- [20] Naimi Sadigh, A., Karimi, B., Zanjirani Farahani, R., "A Game Theoretic Approach for Two Echelon Supply Chains with Continuous Depletion", *International Journal of Management Science and Engineering Management*, Vol. 6, No. 6, pp. 408-412, 2011.
- [21] Naimi Sadigh, A., Chaharsooghi, S. K., Sheikhmohammady, M., "A Game Theoretic Approach to Coordination of Pricing, Advertising, and Inventory Decisions in a Competitive Supply Chain", *Journal of Industrial and Management Optimization*, Vol. 12, No. 1, pp. 337-355, 2016.
- [22] Fernandes, L. J., Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A. P., "Strategic Network Design of Downstream Petroleum Supply Chains: Single Versus Multi-Entity Participation", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 91, No. 8, pp. 1557-1587, 2013.
- [23] Oliveira, F., Hamacher, S., "Optimization of the Petroleum Product Supply Chain under Uncertainty: A Case Study in Northern Brazil", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 51, No. 11, pp. 4279-4287, 2012.
- [24] Najmi, A., Shakouri G., H., Nazari, S., "An Integrated Supply Chain: A Large Scale Complementarity Model for the Biofuel Markets", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 86, No. 1, pp. 88-104, 2016.
- [۲۵] اسدی، مونا، قادری، حمید، شوال‌پور، سعید، «مدل بهینه‌سازی طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی تحت تقاضای خودرگرسیون برداری میانگین متحرک»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۷، شماره ۳، صفحه ۵۲-۶۳، ۱۳۹۶.
- [۲۶] خویشتن‌دار، سهیلا، زندیه، مصطفی، دری، بهروز، رعنائی سیادت، سید امید، «ارائه مدل مکان‌یابی- تخصیص زنجیره تأمین چهارمرحله‌ای بیومتان (مورد مطالعه: طراحی زنجیره تأمین بیومتان

در استان خراسان رضوی»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۷، شماره ۳، صفحه ۶۴-۷۷، ۱۳۹۶.

- [27] Von Stackelberg, H., "*Market Structure and Equilibrium*", Translated by Bazin, D., Urch, L., Hill, R., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [28] Nash, J., "*Non-Cooperative Games*", *Annals of Mathematics*, Vol. 54, No. 2, pp. 286-295, 1951.