DOI : 10.22034/jrenew.2024.186881

سال یازدهم، شماره اول، بهار و تابستان 1403، ص ص 90- 99

**فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو**

**jrenew.ir**

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

**مقاله پژوهشی**

تاریخ دریافت: 1401/09/17

تاریخ پذیرش: 1402/09/11

# ارزیابی تاثیر جایگزینی سوخت در بخش حمل و نقل بر انتشار گازهای گلخانه‌ای

**زهرا عادل برخوردار[1*]، ویدا ورهرامی[2]**

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

2 - دانشیار، دانشکده اقتصاد و علوم سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* تهران، 167651719، z_adel@sbu.ac.ir

**چکیده**

گاز طبیعی به عنوان سوخت واسط برای کاهش انتشار کربن در کوتاه مدت پیشنهاد شده است. مطالعه حاضر به بررسی اثرات جایگزینی بنزین با گاز طبیعی می‌پردازد. به این منظور از یک مدل سیستم عرضه انرژی به نام مسج به همراه معادلات پیش‌بینی تقاضا استفاده شده است. این چارچوب برای برآورد اثرات مستقیم و غیرمستقیم تغییر از بنزین به سی‌ان‌جی در خودرو سبک بخش حمل و نقل ایران به کمک مکانیزم قیمتی برای انگیزه‌دهی به مصرف‌کننده استفاده شده است. قیمت نسبی بنزین به گاز طبیعی در دو سناریو به مقدار 20 و 73 درصد افزایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد اثرات مستقیم و غیرمستقیم از طریق پنج کانال اصلی اعمال می‌شود: اثر مستقیم جایگزینی بنزین و گاز در سبد خانوار، اثر درآمدی، بالادستی صنعت گاز و بالادستی صنعت نفت و هزینه‌های سیستم عرضه انرژی. انتشار گازهای گلخانه‌ای به دلیل اثرات مستقیم و غیرمستقیم جایگزینی بنزین با گاز طبیعی به ترتیب حدود 2200 و 5100 گیگاگرم معادل دی اکسید کربن در سناریوهای 1 و 2 تغییر قیمت نسبی کاهش می‌یابد. هزینه سیستم عرضه انرژی نیز به میزان 0.3٪ و 1.3٪ کاهش می یابد.

**کلیدواژگان:** گاز طبیعی، سیستم عرضه انرژی، حمل و نقل، انتشار گازهای گلخانه‌ای

# Assessing the economic and emission effects of fuel-switching in the transportation sector

**Zahra Adel Barkhordar[1*], Vida Varahrami[2]**

1- Assisstant Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, Faculty of Economics and Political Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 167651719 Tehran, Iran, z_adel@sbu.ac.ir

Received: 8 November 2022 Accepted: 2 December 2023

**Abstract**

Natural gas has been suggested in the literature as a bridge fuel to reduce near term carbon dioxide emissions. The present study investigates the direct and indirect effects of fuel-switching toward natural gas. An energy supply model named MESSAGEix is used along with transportation demand regression equations. The framework is used to estimate the direct and indirect effects of switching from gasoline to compressed natural gas in the light duty transportation sector of Iran. The relative price of gasoline to natural gas is changed by 20% and 73% in two scenarios. Results show that the greenhouse gas emission effects act through five main channels: direct gasoline and gas substitution effect, income effect, upstream gas and upstream oil and energy supply system costs. The greenhouse gas emission is reduced due to the direct and indirect effects by around 2200 and 5100 gigagram carbon dioxide equivalent in scenarios 1 and 2 of relative price change. The total energy system costs also decrease by 0.3% and 1.3% respectively.

**Keywords:** natural gas, energy system model, transportation sector, emission reduction



مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص 4 کریتیو کامنز محفوظ است

## 1- مقدمه

برای مقابله با گرمایش جهانی، می‌بایست انتشار گازهای گلخانه‌ای[1] به عنوان یک عامل تعیین کننده اصلی تغییرات آب و هوایی کاهش یابد [1]. بخش حمل و نقل یکی از مصرف‌کنندگان اصلی نفت است که سهم آن از کل مصرف انرژی به طور قابل توجهی از 23 درصد کل مصرف جهانی انرژی نهایی در سال 1971 به 29 درصد در سال 2015-2017 افزایش یافته است.[2] انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای از بخش حمل و نقل حدود 22 درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی از بخش انرژی است [2]. بر این اساس، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش حمل و نقل از اهمیت حیاتی برخوردار است. گاز طبیعی به عنوان سوخت پل[3] برای کاهش انتشار کربن در کوتاه مدت پیشنهاد شده است. مزایای کاهش انتشار در محل (اثرات مستقیم) و چرخه عمر (اثرات غیرمستقیم) در اثر تغییر به گاز طبیعی توسط برخی مطالعات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مطالعه حاضر به بررسی اثرات مستقیم و غیرمستقیم تغییر سوخت در بخش حمل و نقل می‌پردازد. برای در نظر گرفتن اثرات مستقیم و غیرمستقیم تغییر سوخت بر انتشار کربن، از یک مدل تامین انرژی از پایین به بالا [4]به نام مسج استفاده می‌شود. مدل مسج زنجیره تامین انرژی را همراه با تعامل بین تمام حامل‌های انرژی در نظر می‌گیرد.

هدف مطالعه حاضر پر کردن شکاف تحقیقاتی از دو جنبه است: 1) با تجزیه پیامدهای انتشار سوئیچینگ سوخت در بخش حمل و نقل به اثرات مستقیم و غیرمستقیم و شناسایی کانال‌هایی که این اثرات از طریق آنها کار می‌کنند. 2) با تجزیه و تحلیل پیامدهای اجرای سیاست‌های قیمتی برای تغییر به سی‌ان‌جی در بخش حمل و نقل با استفاده از یک مدل ترکیبی. پژوهش حاضر به شرح زیر سازماندهی شده است. بخش 2 مروری بر ادبیات سوئیچینگ سوخت ارائه می‌کند. بخش 3 روش شناسی برآورد انتشار با استفاده از چارچوب ترکیبی را شرح می‌دهد. نتایج مدل در بخش 4 ارائه شده است. در نهایت بخش 5 به ارائه پیشنهادات در زمینه تعویض سوخت در بخش حمل و نقل می‌پردازد.

## 2- پیشینه پژوهش

رویکردهای مختلفی برای کاهش انتشار وجود دارد. نتایج برخی از مطالعات حاکی از اینست که تغییر به سوختی با نسبت کربن به هیدروژن پایین‌تر می‌تواند راه‌حل اقتصادی مناسبی برای کاهش انتشار باشد [3، 4]. اگرچه تغییر سوخت به عنوان یک گزینه در بلندمدت مطرح نیست، اما می‌تواند تا نفوذ استراتژی‌های کاهش دهنده کلیدی مانند نفوذ تجدیدپذیرها مورد استفاده قرار گیرد. برخی از مطالعات نیز تغییر به سوخت کم کربن را به عنوان یک سیاست زیست محیطی بدون پشیمانی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بدون تهدید توسعه اقتصادی می‌شناسند [5].

سوئیچینگ سوخت موضوع مطالعات مختلف در مقیاس‌های مختلف بوده است. از یک واحد فرآیند تولید مانند واحد تقطیر اتمسفری در یک پالایشگاه خام [6، 3] تا یک سیستم واحد تولیدی مانند یک نیروگاه[7، 8] تا یک بخش اقتصادی مانند بخش صنعتی [9، 10] یا مسکونی [11] تا تحلیل برای کل اقتصاد [5]. برخی از مطالعات مزایای سوئیچینگ سوخت را بر اساس قابلیت فنی و وجود پتانسیل فیزیکی برای سوئیچینگ در سیستم مورد بررسی ارزیابی می‌کنند [12.] توجیه اقتصادی و مالی نیز توسط برخی مطالعات بر اساس هزینه‌های مرتبط و قیمت سوخت ارزیابی می‌شود [13].

از آنجایی که گاز طبیعی محتوای کربن پایینی دارد، جایگزین مناسبی برای زغال سنگ و فرآورده‌های نفتی متوسط تا سنگین در نظر گرفته می‌شود [14، 15]. برخی معتقدند گاز طبیعی به عنوان سوخت پل برای انتقال به منابع انرژی پاک عمل می‌کند [16، 17]. علیرغم محتوای کم کربن گاز طبیعی، نشت متان از زنجیره تامین گاز طبیعی برتری گاز طبیعی از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای را مورد تردید قرار داده است. بنابراین، برای ارزیابی اثرات سوئیچینگ سوخت، کل زنجیره تامین گاز طبیعی باید در نظر گرفته شود [18، 19]. در این شرایط نتایج تحقیقات همگرا نیستند. در حالی که برخی از مطالعات به نفع انتقال به گاز طبیعی هستند [20، 21]، برخی از مطالعات نتیجه کاهش انتشار در اثر جایگزینی با گاز طبیعی را زیر سوال می‌برند [22، 23].

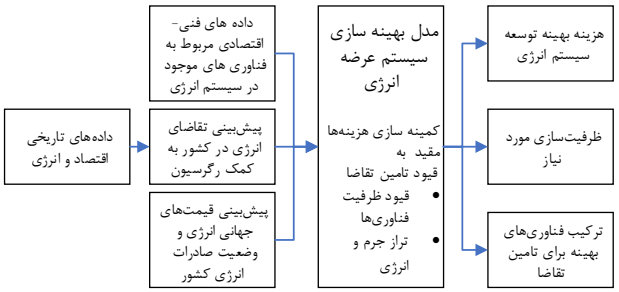
نتایج متفاوت از تفاوت در حوزه مورد مطالعه (مانند نیروگاه‌ها و کشتی‌های دریایی)، تفاوت در معیارها (مانند میزان نشت یا مقادیر بازده انرژی)، یا تفاوت در رویکردهای روش‌شناسی (مانند رویکردهای پایین به بالا در مقابل رویکردهای بالا به پایین) ناشی می‌شوند. برخی از مطالعات تأثیر معیارهای مختلف را بر انتشار تخمینی گازهای گلخانه‌ای ارزیابی کرده اند (به عنوان مثال [24]). از نظر چارچوب روش‌شناسی، اکثر مطالعات از ارزیابی چرخه عمر برای تحلیل مزایای زیست‌محیطی تغییر به گاز طبیعی استفاده می‌کنند (به‌عنوان مثال، [25، 26، 27، 11]). تجزیه و تحلیل چرخه عمر، انتشارات از استخراج تا مصرف (معمولاً احتراق) سوخت را پوشش می‌دهد [1، 28]. میزان انتشار با استفاده از نرخ انتشار احتراق سوخت و نشت‌های بالادستی گاز طبیعی تخمین زده می‌شود. قابلیت فنی تغییر به سی‌ان‌جی نیز در برخی از مطالعات با استفاده از روش‌های ارزیابی چرخه عمر نشان داده شده است [29- 31].

این مدل‌ها اغلب مدل‌هایی از پایین به بالا هستند که بر جزئیات فنی سیستم مورد مطالعه تمرکز می‌کنند. در حالی که این مدل‌ها بر روی طرف عرضه یک سوخت تمرکز می‌کنند، از تعاملات بین زنجیره‌های تامین انرژی غفلت می‌کنند. فرض مخفی در این بررسی‌ها، فراوانی سوخت‌های در نظر گرفته شده است که ممکن است حداقل به صورت منطقه‌ای صادق نباشد. در صورت کمبود منابع انرژی، تعویض سوخت قیمت سوخت و تعادل را در بازار عرضه و تقاضای انرژی تغییر می‌دهد. به عنوان مثال، افزایش تقاضای گاز طبیعی برای نیروگاه‌ها ممکن است به طور غیرمستقیم عرضه را برای بخش مسکونی کاهش دهد. بنابراین، حرکت به سمت سوئیچینگ سوخت در یک بخش ممکن است منجر به تعویض غیرعمدی سوخت در بخش‌های دیگر شود. این مساله باید در تجزیه و تحلیل اثرات تعویض سوخت بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شود. مطالعه حاضر اثرات سوئیچینگ به سمت گازطبیعی را با در نظر گرفتن کل سیستم عرضه انرژی کشور ارزیابی می‌کند.

1. GHG
2. آژانس بین المللی انرژی، 2019
3. Bridge Fuel
4. Bottom-up

## 3- روش شناسی

برای ارزیابی تأثیر سیاست‌های انرژی بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سیستم عرضه انرژی می‌توان از مدل‌های فنی استفاده کرد. مدل‌های فنی از پایین به بالا، ویژگی‌های فنی فناوری‌ها را در نظر می‌گیرند و می‌توانند جایگزینی فناوری‌ها و حامل‌های انرژی را بر اساس مشخصات فنی-اقتصادی آن‌ها ارزیابی کنند. از آنجایی‌که هدف از توسعه سیستم عرضه انرژی، تامین تقاضا است نیاز است تا پیش‌بینی مقدار تقاضا برای سال‌های مورد بررسی به‌صورت برون‌زا به مدل داده شود تا بر اساس آن مدل بتواند میزان ظرفیت‌سازی لازم را بر اساس کمینه‌سازی هزینه‌های کل سیستم تعیین نماید. تقاضای انرژی ورودی مدل عرضه انرژی با استفاده از تحلیل رگرسیون تخمین زده شده است. شکل 1 نمودار جریان مدل بهینه‌سازی سیستم انرژی را نشان می‌دهد.




**شکل 1** نمودار جریان مدل بهینه‌سازی سیستم انرژی

### 3-1-مدل عرضه انرژی

مدل عرضه انرژی مورد استفاده در مطالعه حاضر مدل مسج است که در یاسا [32] توسعه یافته و یک چارچوب مدل‌سازی برای برنامه‌ریزی میان‌مدت تا بلندمدت سیستم انرژی، تحلیل سیاست انرژی و توسعه سناریو است. این مدل یک مدل عرضه انرژی مبتنی بر تقاضا و مبتنی بر فناوری است که انواع مختلف گزینه‌ها در استفاده از فناوری‌های سیستم انرژی برای برآوردن تقاضای انرژی را با هم ترکیب می‌کند. این سیستم مبتنی بر سیستم مرجع انرژی است که نمایش شبکه‌ای از تمام فناوری‌های عملیاتی مورد نیاز برای تامین انرژی برای تامین مصرف نهایی است.

مسج مدل برنامه ریزی خطی پویا است که هزینه‌های کل سیستم انرژی را برای تامین تقاضای انرژی به حداقل می‌رساند. هزینه‌های کل شامل هزینه‌های سرمایه گذاری، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های زیست محیطی است. هزینه سیستم انرژی با توجه به مجموعه ای از محدودیت‌ها به حداقل می‌رسد که منطقه امکان پذیر را تعریف می‌کند. یک دسته اصلی از محدودیت‌ها مربوط به محاسبه تعادل انرژی (تراز جرم و انرژی) در تمام سطوح سیستم انرژی می‌شود. محدودیت‌های دیگر شامل محدودیت‌های استخراج منابع، محدودیت‌های فنی و مهندسی، محدودیت‌های مربوط به استحصال انرژی‌های تجدیدپذیر و محدودیت‌های ظرفیت و فعالیت می‌شوند. برای آشنایی کامل مدل لطفا رجوع شود به مستندات آنلاین مدل [33].

مدل مسج سیستم انرژی ایران شامل فناوری‌های اصلی در لایه‌های استخراج، فراورش، تبدیل، انتقال، توزیع و تقاضا است. تقاضای حامل‌های انرژی در بخش‌های خانوار، حمل و نقل، صنعت، تجاری- اداری و کشاورزی داده شده است. در میان سوخت‌های فسیلی، نفت و گاز بیشترین حجم منابع انرژی را تشکیل می‌دهند و زغال سنگ سهم ناچیزی را به خود اختصاص می‌دهد. فناوری‌های بکارگرفته شده در مدل شامل تکنولوژی‌های استخراج و پالایشگاه‌های نفت و گاز، فناوری‌های تولید برق و توزیع برق، گاز طبیعی و فرآورده‌های نفتی است. با توجه به افت فشار میادین نفت، ازدیاد برداشت به کمک تزریق گاز طبیعی نیز در نظر گرفته شده است. جدول 1 فناوری‌های بکارگرفته شده در مدل و پیوست 1 منتخب داده‌های ورودی مدل را نشان می‌دهد. پارامترهای مربوط به ازدیاد برداشت با توجه به مطالعات موردی صورت گرفته محاسبه شده است [34، 35]. شکل 2 سیستم مرجع انرژی را از استخراج تا مصرف حامل‌های اصلی انرژی نشان می‌دهد. کل زنجیره تامین گاز طبیعی، نفت و سایر حامل‌های انرژی در نظر گرفته شده است. کمبود منابع با استفاده از محدودیت‌های مدلی که استخراج انرژی را محدود می‌کند، مدل‌سازی می‌شود. انتشار و نشت احتمالی از هر فناوری با استفاده از ضرایب انتشار محاسبه می‌شود. بنابراین، سوئیچینگ سوخت و اثرات غیرمستقیم آن بر کل سیستم انرژی به خوبی از طریق مدل سیستم انرژی بررسی می‌شود.

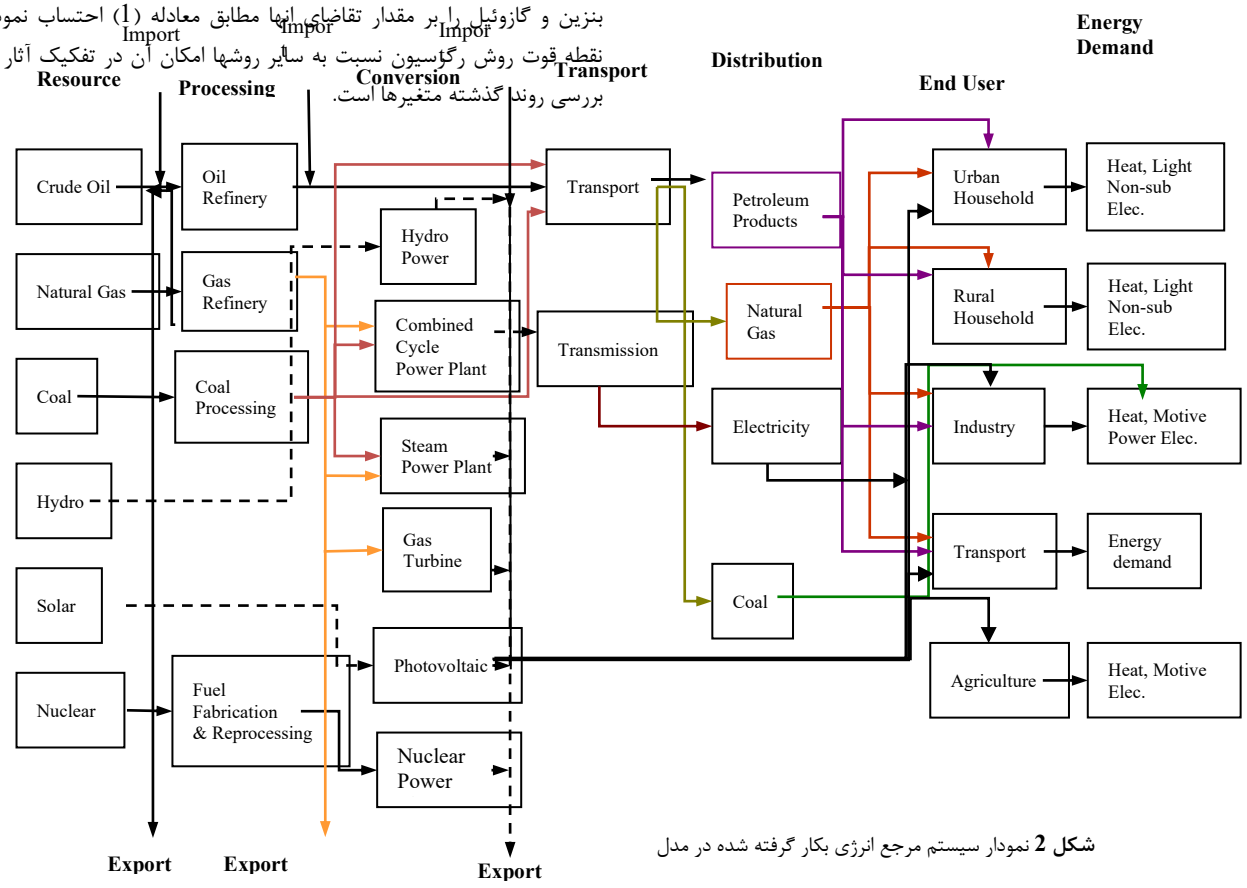
**جدول 1** فناوری‌های بکارگرفته شده در سیستم عرضه انرژی

| نام فناوری | لایه در سیستم مرجع انرژی |
|---|---|
| پالایشگاه نفت ساده | فراورش |
| پالایشگاه نفت پیچیده | فراورش |
| پالایشگاه نفت پیچیده با جذب کربن | فراورش |
| پالایشگاه گاز | فراورش |
| نیروگاه گازی | تبدیل |
| نیروگاه بخار | تبدیل |
| نیروگاه سیکل ترکیبی | تبدیل |
| نیروگاه سیکل ترکیبی همراه با جذب کربن | تبدیل |
| نیروگاه ذغال‌سنگ‌سوز | تبدیل |
| نیروگاه ذغال‌سنگ‌سوز با جذب کربن | تبدیل |
| نیروگاه هسته‌ای | تبدیل |
| واحد غنی سازی اورانیوم | فراورش |
| تولید همزمان برق و حرارت | تبدیل |
| نیروگاه برقابی | تبدیل |
| نیروگاه خورشیدی | تبدیل |
| نیروگاه خورشیدی حرارتی | تبدیل |
| نیروگاه بادی | تبدیل |
| نیروگاه زمین گرمایی | تبدیل |
| نیروگاه امواج | تبدیل |
| باتری | انتقال |
| نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای | تبدیل |

### 3-2-تقاضای بنزین و سی‌ان‌جی

دسترسی به منابع عظیم گاز طبیعی و مشکل آلودگی هوا در کلان شهرها، دولت را بر آن داشته تا سیاست جایگزینی بنزین با سی‌ان‌جی را در خودروهای سبک دنبال کند. در سال 1393 در ایران به دلیل اختلاف قیمت کم گاز طبیعی نسبت به بنزین، فاصله زیاد جایگاه‌های سی‌ان‌جی ، شلوغی جایگاه‌های سی‌ان‌جی و خطرات احتمالی استفاده از سوخت سی‌ان‌جی و

نگرانی‌های ایمنی احتمالی از این نوع سوخ در خودروها موجب کاهش مصرف سی‌ان‌جی گردید. تا آبان 1398 قیمت بنزین لیتری 1000 تومان و تک نرخی بود که بر مبنای برابری ارزش حرارتی آن، قیمت سی‌ان‌جی کمتر از نصف قیمت بنزین بود[1]. از آبان 98 به بعد فاصله قیمت سی‌ان‌جی با قیمت




**شکل 2** نمودار سیستم مرجع انرژی بکار گرفته شده در مدل

بنزین آزاد به یک‌هفتم رسید. قیمت نسبی بنزین به سی‌ان‌جی از 2 به بیش از 3 افزایش یافت. این شکاف قیمتی ابزار محرکی برای تبدیل خودروهای سبک معمولی به خودروهای دوگانه سوز بود. در نتیجه مصرف سی‌ان‌جی از حدود 19 به 24 میلیون متر مکعب در روز افزایش یافت. جابجایی بین دو فناوری صرفاً به عوامل قیمتی بستگی ندارد. عوامل دیگری مانند فضای بار کمتر و مسافت پیموده شده کمتر خودروهای سی‌ان‌جی نیز بر تبدیل به خودروی دوگانه سوز تأثیر می‌گذارند. این موارد همانند یک هزینه بر تصمیم استفاده از خودروی دوگانه‌سوز تاثیر منفی می‌گذارند. با این حال، با ارزان‌تر شدن سی‌ان‌جی، این هزینه‌های منفی در مقابل نفع ناشی از استفاده از سی‌ان‌جی کم‌رنگ‌تر شده و تأثیر منفی این عوامل بر تقاضای سی‌ان‌جی کاهش می‌یابد.

تخمین اقتصادسنجی حاضر به بررسی تأثیر سیاست قیمت‌گذاری بر تغییر بنزین به سی‌ان‌جی طی دوره زمانی 1377 تا 1398 می‌پردازد. برای انجام این کار، با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی، اثر درآمدی و اثر جایگزینی تغییرات قیمت سی‌ان‌جی و بنزین بر تقاضای بنزین و سی‌ان‌جی در بخش حمل و نقل مورد بررسی قرار می‌گیرد. علت استفاده از این روش از این منظر است که به تفکیک می توان آثار درآمدی و جانشینی تغییر قیمت بنزین و گازوئیل را بر مقدار تقاضای انها مطابق معادله (1) احتساب نمود. نقطه قوت روش رگرسیون نسبت به سایر روشها امکان آن در تفکیک آثار و بررسی روند گذشته متغیرها است.

$$\text{تقاضای بنزین} = C_1 + C_2 \times \text{سرانه تولید ناخالص داخلی} + C_3 \times \text{قیمت بنزین} + C_4 \times \text{قیمت سی‌ان‌جی} + C_5 \times \text{تغیر مجازی} \quad (1)$$

جهت انجام برازش مدل ابتدا مانایی متغیرها با استفاده از آزمون دیکی‌فولر بررسی شد که همه متغیرها در سطح مانا هستند. نتیجه رگرسیون تقاضای بنزین در بخش حمل و نقل با روش حداقل مربعات معمولی در جدول 2 نشان داده شده است.

**جدول 2** نتایج رگرسیون تقاضای بنزین

| متغیرها | ضرایب | آماره t | احتمال |
|---|---|---|---|
| سرانه تولید ناخالص داخلی | 0/29 | 3/51 | 0/003 |
| قیمت بنزین | -0/17 | 2/64 | 0/02 |
| قیمت سی‌ان‌جی | 0/13 | 2/98 | 0/035 |
| متغیر مجازی متغیر دامی برای سال | 0/02 | 4/14 | 0/012 |

[1] در سال 1398 قیمت 1 کیلوگرم سی‌ان‌جی 658.6 تومان بوده که با توجه به ارزش حرارتی 49.9 MJ/kg (معادل 1/35 $m^3$ گاز طبیعی)، هر مگاژول آن حدود 13.2 تومان ارزش‌گزاری شده است. در مورد بنزین با توجه به قیمت و ارزش حرارتی 33 MJ/lit آن هر هر مگاژول آن حدود 30 تومان ارزش‌گزاری شده است.

| | | | |
|---|---|---|---|
| های 1386تا 1392 | | | |
| جمله ثابت | 1/6 | 2/28 | 0/013 |
| $R^2$=٪72 | | | |

مطابق نتایج برازش فوق گاز طبیعی جایگزین بنزین در بخش حمل و نقل می باشد که با افزایش یک واحد قیمت گاز طبیعی، مصرف بنزین در بخش حمل و نقل 0/13 واحد افزایش می یابد. با افزایش یک واحد تولید ناخالص داخلی سرانه، مصرف بنزین در بخش حمل و نقل 0/29 واحد افزایش می یابد و این نشان از کالای نرمال بودن بنزین در مصرف بخش حمل و نقل می باشد. با افزایش یک واحد قیمت بنزین، تقاضای آن در بخش حمل و نقل 0/17 واحد کاهش می یابد.

آزمون‌های خودهمبستگی حاکی از احتمال 0/5461، آزمون واریانس ناهمسانی وایت حاکی از احتمال 0/1182 و آزمون نرمالیتی حاکی از احتمال 0/24431 است که در هر سه مورد، فروض کلاسیک تایید می‌گردد. از سویی تمام متغیرهای برازش شده در این جدول، دارای احتمال کمتر از 0/05 بوده و معنادار هستند. لذا در این حالت با وجود ضریب تعیین 0/72، خروجی رگرسیون قابل اتکا است و می‌توان از این خروجی برای پیش‌بینی برای مدت طولانی استفاده نمود.

در ادامه تابع تقاضای سی‌ان‌جی در بخش حمل و نقل به عنوان تابعی از قیمت بنزین، قیمت سی‌ان‌جی و تولید ناخالص داخلی سرانه برآورد می‌شود. همانطور که در جدول 3 نشان داده شده است، بنزین نیز جایگزینی برای سی‌ان‌جی است. با افزایش یک واحد تولید ناخالص داخلی سرانه، تقاضای سی‌ان‌جی 0/23 افزایش می یابد. با افزایش یک واحد قیمت سی‌ان‌جی، تقاضای آن 0/11 واحد کاهش می‌یابد و با افزایش یک واحد قیمت بنزین، تقاضای سی‌ان‌جی 0/15 افزایش خواهد یافت. پیرامون برازش فوق آزمون‌های صحت تصریح اعم از آزمون خودهمبستگی، آزمون واریانس ناهمسانی و آزمان نرمال بودن پسماند همگی بررسی و در همه موارد، فرضیه صفر با اطمینان 95 درصد رد شد.

پیرامون برازش فوق آزمون‌های صحت تصریح اعم از آزمون خودهمبستگی، آزمون واریانس ناهمسانی و آزمان نرمال بودن پسماند همگی بررسی و در همه موارد، فرضیه صفر با اطمینان 95 درصد رد شد.

**جدول 3** نتایج رگرسیون تقاضای سی‌ان‌جی

| متغیرها | ضرایب | آماره t | احتمال |
|---|---|---|---|
| سرانه تولید ناخالص داخلی | 0/23 | 2/92 | ٪002 |
| قیمت بنزین | 0/15 | 2/15 | 0/018 |
| قیمت سی‌ان‌جی | -0/11 | 3/18 | 0/03 |
| جمله ثابت | 0/98 | 2/63 | 0/029 |
| $R^2$=٪95 | | | |

### 3-3-تعریف سناریو

سه سناریو برای ارزیابی اثر جایگزینی با گازطبیعی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در بازه 1401 تا 1409 معرفی شده است. در سناریوی پایه، قیمت نسبی سی‌ان‌جی و بنزین ثابت است. در سناریوهای قیمت‌گذاری نسبی (سناریوهای 1 و 2) تاثیر تغییرات قیمت نسبی بین بنزین و سی‌ان‌جی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی می‌شود. در این سناریوها قیمت بنزین افزایش و قیمت سی‌ان‌جی ثابت فرض می‌شود. در سناریوی 1 قیمت بنزین به صورت خطی افزایش می‌یابد به طوری که در پایان دوره (سال 1409) قیمت بنزین به سی‌ان‌جی بیست درصد نسبت به سال 1400 افزایش می‌یابد. در سناریوی 2 قیمت بنزین 73 درصد افزایش می‌یابد. مقدار افزایش به گونه ای انتخاب شده است که اثر مستقیم جایگزینی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای برابر با کاهش 4 درصدی در انتشار بنزین و در بخش خودروهای سبک سی‌ان‌جی در مقایسه با سناریوی پایه باشد. عدد چهار درصد از تعهد بی قید و شرط ایران در توافق‌نامه پاریس به کاهش انتشارات گازهای گلخانه‌ای گرفته شده است.

## 4-نتایج

در این بخش، ابتدا تحلیل هزینه و فایده امکان سنجی جایگزینی بنزین با گاز طبیعی در بخش حمل و نقل ایران انجام می‌شود. در مرحله بعد، اثر مستقیم جایگزینی با گاز طبیعی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای به کمک تحلیل سمت تقاضا ارائه می‌شود و سپس اثر غیرمستقیم به کمک تجزیه و تحلیل سیستم انرژی بیان می‌شود.

### 4-1-تحلیل هزینه و فایده

برای تجزیه و تحلیل اثرات سیاست جایگزینی با گاز طبیعی، ابتدا امکان سنجی اقتصادی استفاده از سی‌ان‌جی در خودروهای سبک با استفاده از تحلیل هزینه-فایده ارزیابی می‌شود. خودروهای دوگانه سوز بیشترین خودروهای مصرف کننده سی‌ان‌جی در ایران هستند.

هزینه دوگانه سوز کردن خودرو 5 میلیون تومان در سال 98 و قیمت سی‌ان‌جی 657 تومان بر کیلوگرم در همان سال بوده است. ارزش حرارتی سی‌ان‌جی بیشتر از بنزین است اما عموما در ماشین‌های گازسوز به طور میانگین هر کیلوگرم گاز سی‌ان‌جی، به اندازه 1/36 لیتر بنزین کارایی دارد [34]. در عمل به دلیل افت توان خودرو در صورت استفاده از سی‌ان‌جی، مسافت طی شده به ازای مصرف هر متر مکعب گاز طبیعی حدودا معادل مسافت طی شده با یک لیتر بنزین است. [1]با توجه به قیمت 1500 تومان به لیتر بنزین و 60 لیتر سهمیه ماهانه و فرض متوسط مصرف 80 لیتر در ماه خانوارها و قیمت 500 تومان به مترمکعب سی‌ان‌جی حدود 5 سال به طور متوسط طول می‌کشد تا هزینه صرفه جویی شده ناشی از مصرف سی‌ان‌جی با تفاوت قیمت بنزین و سی‌ان‌جی سر به سر شود (پیوست 2).

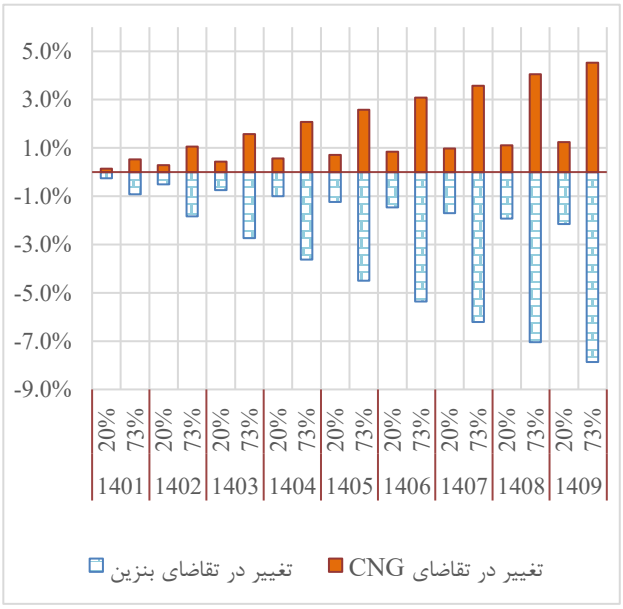
مطابق همین محاسبات، اگر بخواهیم استفاده از سی‌ان‌جی توجیه بیشتری داشته باشد می‌بایست قیمت بنزین گران تر از سی‌ان‌جی شود. با ثابت نگه داشتن سی‌ان‌جی و افزایش قیمت بنزین می‌توان قیمتی را بدست آورد که در آن بازگشت سرمایه به حدود سه سال کاهش پیدا کند. از تحلیل مهندسی اقتصادی [2] قیمت بنزین می‌بایست از متوسط 1875 تومان به 2250 تومان برسد (20 درصد افزایش). از این مقدار به عنوان مقدار افزایش در سناریو 1 استفاده خواهد شد.

1. http://savalangaz.ir/%D9%85%D8%AE%D8%B2%D9%86-سی‌ان‌جی/
2. در این تحلیل مقدار تقاضای خدمات انرژی با افزایش قیمت تغییری نمی‌کند.

**4-2-اثر مستقیم: تحلیل تقاضا**

با توجه به تأثیر تفاوت قیمت بین سی‌ان‌جی و بنزین بر تغییر سوخت، هدف مطالعه حاضر استفاده از یک سیاست قیمت‌گذاری برای بررسی تأثیر تغییر به سی‌ان‌جی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای است. مکانیسم قیمت گذاری به نفع سی‌ان‌جی خواهد بود. قیمت بنزین افزایش و قیمت سی‌ان‌جی ثابت است. سیاست مشابهی در سال 1398 اجرا شد.

افزایش قیمت بنزین باعث کاهش تقاضا برای بنزین از دو طریق می‌شود: یکی اثر جایگزینی و دیگری اثر درآمدی. اثر جایگزینی که منعکس کننده اثر تغییر قیمت‌های نسبی بر مصرف است، منجر به افزایش تقاضا برای سی‌ان‌جی می‌شود. اثر درآمدی که تأثیر تغییرات قدرت خرید بر مصرف را نشان می‌دهد، منجر به کاهش تقاضای سی‌ان‌جی می‌شود. نتایج مدل نشان می‌دهد در سناریو اول تغییر قیمت نسبی، با توجه به افزایش 20 درصدی قیمت نسبی بنزین، تقاضای بنزین به میزان 1/1 درصد کاهش و تقاضای




**شکل 3** اثر مستقیم تغییر قیمت‌های نسبی بر تقاضای بنزین و سی‌ان‌جی

سی‌ان‌جی در سال 1409 نسبت به سال 1400، 1/37 درصد افزایش یافته است.

در سناریوی 2، قیمت بنزین 73 درصد افزایش یافته است. هر چه افزایش قیمت بنزین بیشتر باشد، تقاضای سی‌ان‌جی بیشتر می‌شود. شکل 3 اثر مستقیم افزایش قیمت بنزین بر تقاضای بنزین و سی‌ان‌جی را در مدل تقاضا نشان می‌دهد.

برای تفکیک اثر جایگزینی و اثر درآمدی، ابتدا اثر جایگزینی بر اساس تعریف آن تخمین زده می‌شود. اثر جایگزینی تغییر در تقاضای سی‌ان‌جی را اندازه گیری می‌کند به شرطی که سطح مطلوبیت مصرف کننده تغییر نکند. مسافت طی شده همان چیزی است که مطلوبیت ایجاد می‌کند، بنابراین اثر جایگزینی افزایش قیمت بنزین را می‌توان با توجه به سی‌ان‌جی مورد نیاز برای طی مسافت مساوی با بنزین تخمین زد. کاهش باقی مانده در تقاضای بنزین به دلیل اثر درآمدی است. تغییر در انتشار گازهای گلخانه‌ای را می‌توان بر اساس ضرایب انتشار بنزین و سی‌ان‌جی محاسبه کرد. این به عنوان اثر مستقیم جایگزینی با گاز طبیعی به کمک مکانیزم قیمتی در نظر گرفته می‌شود. شکل 4 دو کانال را نشان می‌دهد که از طریق آنها اثر مستقیم تعویض سوخت باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود: اثرات جایگزینی و درآمدی. تغییر در انتشار به صورت خالص تغییرات ناشی از کاهش مصرف بنزین و افزایش مصرف سی‌ان‌جی محاسبه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در سناریوی 2 (73 درصد افزایش قیمت بنزین) کاهش انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای در سال 1409 (2030) نسبت به سناریو پایه 4 درصد است.

**4-3-اثر غیر مستقیم: تحلیل سیستم عرضه انرژی**

تغییر در تقاضا برای بنزین و سی‌ان‌جی زنجیره تامین آنها را تغییر می‌دهد که به نوبه خود باعث تغییر انتشار گازهای گلخانه‌ای از سیستم عرضه انرژی می‌شود. کاهش تقاضای بنزین در کوتاه مدت موجب افزایش عرضه بنزین

**شکل 4** اثر مستقیم تغییر قیمت‌های نسبی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای به تفکیک اثر جایگزینی و اثر درآمدی

صادراتی و در بلندمدت کاهش ظرفیت سازی پالایشگاه‌ها می‌شود. افزایش صادرات منجر به افزایش درآمد ارزی می‌شود و بر تولید ناخالص داخلی تأثیر می‌گذارد. بررسی تاثیر مورد دوم نیاز به استفاده از مدل اقتصاد دارد.

بکارگیری مدل عرضه انرژی به تعیین اثرات غیرمستقیم تغییر تقاضا بر عرضه انواع حامل‌های انرژی در زنجیره عرضه انرژی کمک می‌کند. جایگزینی با گاز طبیعی منجر به کاهش انتشار در سیستم عرضه نفت به دلیل کاهش تقاضای بنزین می‌شود. مقالات مربوط به ارزیابی چرخه عمر جایگزینی با گاز طبیعی عموما تأثیرات جایگزینی بر زنجیره عرضه حامل انرژی جایگزین شده را در نظر نمی‌گیرد. تغییر خالص در انتشار گازهای گلخانه‌ای سیستم انرژی (شامل عرضه و تقاضای انرژی) به عنوان مجموع اثرات مستقیم و غیرمستقیم جایگزینی با گاز طبیعی در نظر گرفته می‌شود. جدول 4 تغییر در انتشار گازهای گلخانه‌ای را برای هر دو سناریو به تفکیک بخش‌های مختلف سیستم عرضه انرژی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود در پایان دوره (سال

1409) کاهش انتشار در اثر کاهش استخراج و پالایش نفت خام (که شامل فلر نیز می‌شود) به تنهایی تقریبا با افزایش انتشار در اثر احتراق سی‌ان‌جی در خودروهای سبک برابری می‌کند.

تعویض سوخت در سیستم عرضه انرژی هزینه سالانه سیستم انرژی را تغییر می‌دهد. از آنجایی که بخشی از سیستم عرضه انرژی توسط بودجه دولت اداره می‌شود تغییرات در هزینه‌های مرتبط، بودجه دولت را تغییر می‌دهد. این به نوبه خود بر مخارج و سرمایه گذاری دولت تأثیر می‌گذارد. نتایج مدل نشان می‌دهد که برای سناریوهای 1 و 2 هزینه کل سیستم انرژی به ترتیب 0/3 و 1/3 درصد کاهش می‌یابد. این به ترتیب معادل هزینه اولیه یک نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی 50 مگاواتی / 180 مگاواتی است. جدول 5 اثرات مستقیم و غیر مستقیم را برای دو سناریو تغییر قیمت نسبی نشان می‌دهد.

**جدول 4** تغییر در انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال 1409 (2030) نسبت به سناریو پایه به واحد گیگا گرم معادل دی‌اکسید کربن

| | افزایش 20٪ قیمت‌های نسبی | افزایش 73٪ قیمت‌های نسبی |
|---|---|---|
| پالایشگاه نفت | -۱۷۹ | -۶۳۲ |
| پالایشگاه گاز | ۱۲ | ۱۲۹ |
| استخراج نفت | -۸۱ | -۲۸۵ |
| استخراج گاز | ۳۳ | ۳۵۴ |
| انتقال و توزیع گاز | ۹ | ۷۸ |
| بنزین در خودرو سبک | -۲۲۳۱ | -۸۱۰۷ |
| سی‌ان‌جی در خودرو سبک | ۲۷۱ | ۹۹۷ |
| تغییر کل در انتشار گازهای گلخانه ای | -۲۱۶۶ | -۵۱۰۹ |

**جدول 5** تغییر در انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال 1409 (2030) نسبت به سناریو پایه به واحد گیگا گرم معادل دی‌اکسید کربن

| تفکیک نوع اثر | 20٪ افزایش قیمت نسبی بنزین به سی‌ان‌جی | 73٪ افزایش قیمت نسبی بنزین به سی‌ان‌جی |
|---|---|---|
| اثر مستقیم | -1960 | -7111 |
| اثر غیر مستقیم | -206 | 2002 |
| *مجموع* | -2166 | -5109 |

### 4-4-تحلیل حساسیت

بخش ردیاب جهانی فلر گازها در بانک جهانی به عنوان تنها مرجع جهانی و مستقل گازهای فلر، شدت فلر گاز در صنعت نفت ایران را در سال 1400 برابر با 15/4 مترمکعب گاز دی‌اکسید کربن به ازای یک بشکه نفت خام تخمین زده است [36]. این مقدار به عنوان انتشار بخش استخراج نفت در نظر گرفته شده است. کاهش استخراج نفت خام به دلیل کاهش نیاز به بنزین این انتشار را تحت تاثیر قرار می‌دهد[1]. در بخش گاز طبیعی نیز بخش مهمی از انتشارات، انتشار متان در قالب انتشارات فرار و نشر تخلیه در نظر گرفته شده است. بنا به تخمین آژانس بین‌المللی انرژی، انتشارات فرار و نشر تخلیه متان در ایران در سال 1400 برابر با 1613 هزار تن در استخراج گاز طبیعی و 667 هزار تن در انتقال گاز طبیعی بوده‌است [37]. با توجه به تولید 2392 هزار بشکه در روز نفت خام و 257 میلیارد متر مکعب گاز طبیعی در سال 1400 [38] میزان انتشار به ازای یک متر مکعب گاز و یک بشکه نفت خام محاسبه می‌شود. تحلیل حساسیت بر روی مقادیر ضریب نشر به‌صورت جدول 6 انجام می‌شود تا بتوان تاثیر تغییر در این ضرایب را بر نتایج مدل ارزیابی نمود. سه حالت اول تغییرات دو درصدی در مقادیر ضرایب را بررسی می‌کند. این مقدار با توجه به تغییرات موجود در داده‌های سری زمانی صنایع نفت و گاز موجه است. حالت چهارم برای ارزیابی شرایط محتمل کاهش 50 درصدی شدت فلر بر نتایج مدل اضافه شده است.

**جدول 6** تغییر در ضرایب نشر تاثیرگذار بر مزیت استفاده از سی‌ان‌جی

| بخش | حالت 1 | حالت 2 | حالت 3 | حالت 4 |
|---|---|---|---|---|
| فلر گاز در استخراج نفت | ٪+10 | ٪-10 | ٪-10 | ٪-50 |
| انتشارات فرار در استخراج گاز | ٪+10 | ٪+10 | ٪-10 | 0 |
| انتشارات فرار در انتقال گاز | ٪+10 | ٪+10 | ٪-10 | 0 |

نتایج بدست آمده از مدل نشان می‌دهد در شرایط تغییر ضرایب انتشار در سناریو تغییر قیمت‌های نسبی به میزان 73٪ هر چهار حالت بیان شده مطابق انتظار، نسبت به سناریو پایه (عدم تغییر قیمت‌های نسبی) کاهش انتشار دارند. میزان کل کاهش انتشار در شرایط وجود ضرایب اولیه انتشار برابر با 5109- گیگاگرم معادل دی‌اکسید کربن بود. با تغییر ضرایب، به ترتیب حالت 4 با 2.8+٪ بیشترین افزایش و سناریو 3 با 0.3-٪ بیشترین کاهش را نسبت به کاهش انتشار مربوط به سناریو افزایش 73 درصدی قیمت‌های نسبی داشته‌اند. میزان کاهش انتشار در سناریو افزایش 73 درصدی قیمت‌ها برای 4 حالت در نظر گرفته شده بین 4967- و 5124- گیگاگرم معادل دی‌اکسید کربن تغییر می‌کند. این مساله نشان می‌دهد در صورت کاهش فلر در بالادستی نفت (حالت 4)، اثر کاهش تقاضای بنزین بر کاهش انتشار کم شده و مزیت استفاده از سی‌ان‌جی کمی کاهش می‌یابد.

## 5-جمع‌بندی

در مطالعه حاضر اثرات مستقیم و غیرمستقیم کاهش تقاضا برای بنزین و افزایش تقاضا برای سی‌ان‌جی با استفاده از ترکیب مدل تقاضا و عرضه انرژی برآورد شده است. از آنجایی‌که نتایج بدست آمده از مدل‌ها وابسته به مفروضات اساسی بکارگرفته شده در مدل است، جدول 7 به شکل دسته‌بندی شده این فرضیات را نشان می‌دهد.

**جدول 7** فرضیات بکارگرفته شده در مدل

| | |
|---|---|
| *1* | ثابت ماندن شدت فلر گاز در صنعت نفت در مقدار سال 1400 ( 15/4 |

1. فرض شده است که میزان حجم صادرات نفت تابع محدودیت‌های سیاسی بوده و به محدودیت‌های فنی مرتبط نباشد.

| | |
|---|---|
| | مترمکعب گاز دی‌اکسید کربن به ازای یک بشکه نفت خام) |
| 2 | ثابت ماندن مقدار صادرات نفت و گاز در مقدار سال 1400 |
| 3 | ثابت ماندن مقدار انتشارات فرار و نشر تخلیه به ازای یک مترمکعب گازطبیعی در مقدار سال 1400 ( 6/27 و 2/59 گرم متان بر مترمکعب گاز طبیعی در استخراج و انتقال گاز) |
| 4 | یکسان بودن شرایط برای احداث جایگاه عرضه سی‌ان‌جی و بنزین |

نتایج نشان می‌دهد وقتی زنجیره تامین بنزین در کنار سی‌ان‌جی در نظر گرفته می‌شود، اثر خالص کاهش تقاضای بنزین و افزایش تقاضای سی‌ان‌جی کاهش بیشتر انتشار به اندازه 18 درصد نسبت به اثر مستقیم است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد هنگام تجزیه و تحلیل جایگزین کردن سوخت‌ها، زنجیره تامین هر دو حامل انرژی جایگزین شده و جایگزین شونده باید ارزیابی شود. این اثر غیر مستقیم جایگزینی در سیستم عرضه انرژی است. در حالی که مطالعات قبلی عمدتاً بر نشت گاز از گاز بالادست متمرکز بودند مطالعه حاضر کل سیستم عرضه انرژی را در نظر گرفت و تغییر در سبد انرژی و تغییر در انتشار در تمام زنجیره سیستم عرضه انرژی را محاسبه کرد.

در جمع‌بندی آنچه نتایج مطالعه نشان می‌دهد تفوق گاز طبیعی از لحاظ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای حتی در صورت وجود نشت گاز متان در زنجیره تامین گاز است. این تحلیل به اثرات سیاستگزاری بر کاهش انتشار تمرکز داشته و گرچه محدودیت منابع گاز و نفت و هزینه‌های لازم برای استخراج منابع انرژی را لحاظ نموده لیکن از آنجایی که در مطالعه حاضر بحث جایگزینی بین دو سوخت مطرح بوده منابع لازم برای احداث جایگاه‌های سی‌ان‌جی در نظر نگرفته نشده است. به عبارت دیگر فرض شده برای احداث کننده جایگاه فرقی بین جایگاه عرضه بنزین و سی‌ان‌جی وجود نداشته است.

## 6- پیوست

**پیوست 1** جدول داده‌های فنی ورودی مدل

| فناوری | هزینه سرمایه‌گذاری | حامل ورودی | حامل خروجی | نسبت خروجی به ورودی |
|---|---|---|---|---|
| پالایشگاه نفت ساده | $24000 \frac{\$}{b/d}$ [a] | نفت خام | گاز مایع | 0.0258 [a] |
| | | | بنزین | 0.1921 [a] |
| | | | نفت سفید | 0.0387 [a] |
| | | | گازوئیل | 0.2237 [a] |
| | | | نفت کوره | 0.3288 [a] |
| پالایشگاه نفت پیچیده | $30000 \frac{\$}{b/d}$ [b] | نفت خام | گاز مایع | 0.0461 [b] |
| | | | بنزین | 0.3319 [b] |
| | | | نفت سفید | 0.0287 [b] |
| | | | گازوئیل | 0.1728 [b] |
| | | | نفت کوره | 0.2478 [b] |
| پالایشگاه نفت پیچیده همراه با جذب کربن | $48000 \frac{\$}{b/d}$ [c] | نفت خام | گاز مایع | 0.0461 [b] |
| | | | بنزین | 0.3319 [b] |
| | | | نفت سفید | 0.0287 [b] |
| | | | گازوئیل | 0.1728 [b] |
| | | | نفت کوره | 0.2478 [b] |
| پالایشگاه گاز | $65 \frac{\$}{m^3/d}$ [d] | گاز غنی | گاز سبک | 0.8127 [d] |
| | | | گاز مایع | 0.0119 [d] |
| نیروگاه گازی | $630 \frac{\$}{Kw}$ [e] | گاز / گازوئیل | برق | 0.326 [f] |
| نیروگاه سیکل ترکیبی | $690 \frac{\$}{Kw}$ [e] | گاز / گازوئیل | برق | 0.447 [f] |
| نیروگاه سیکل ترکیبی همراه با جذب کربن | $1056 \frac{\$}{Kw}$ [e] | گاز / گازوئیل | برق | 0.447 [f] |
| نیروگاه ذغال‌سنگ‌سوز | $1800 \frac{\$}{Kw}$ [g] | ذغال‌سنگ | برق | 0.35 [g] |
| نیروگاه ذغال‌سنگ‌سوز پیشرفته همراه با جذب کربن | $2550 \frac{\$}{Kw}$ [g] | ذغال‌سنگ | برق | 0.35 [g] |
| تولید همزمان برق و حرارت (CHP) | $707 \frac{\$}{Kw}$ [e] | گاز سبک | برق | 0.65 [h] |
| نیروگاه برقابی | $1000 \frac{\$}{Kw}$ [i] | آب | برق | 0.90 [i] |
| نیروگاه خورشیدی | $883 \frac{\$}{Kw}$ [j] | خورشید | برق | 0.13 |
| نیروگاه خورشیدی حرارتی | $2011.4 \frac{\$}{Kw}$ [k] | نور خورشید | برق | 0.17 [k] |
| نیروگاه بادی | $1355 \frac{\$}{Kw}$ [l] | باد | برق | 0.27 |
| نیروگاه زمین گرمایی [l,m] | $4000 \frac{\$}{Kw}$ [l] | حرارت زمین | برق | 0.20 [m] |
| نیروگاه امواج | $1000 \frac{\$}{Kw}$ [n] | امواج آب اقیانوس | برق | 0.80 [o] |

[a] متوسط گیری از داده‌های تولید و ظرفیت پالایشگاه‌های کشور بر مبنای داده‌های ترازنامه‌های هیدروکربوری صورت گرفته‌است.

[b] از داده‌های پالایشگاه اراک به عنوان پالایشگاه پیچیده استفاده شده است.

[c] Porter, RTJ, Fairweather, M, Kolster, C et al. (3 more authors) (2017) Cost and performance of some carbon capture technology options for producing different quality CO product streams. International Journal of Greenhouse Gas Control, 57. Pp. 185-195.

[d] عربی و همکاران، 1399. بهینه سازی درصد مشارکت بخش داخلی در سرمایهگذاریهای مشترک در اقتصاد ایران (مطالعه موردی صنعت نفت و گاز). فصلنامه علمی پژوهشهای رشد و توسعه اقتصادی ، 10(38).

[e] IEA, 2020, Projected Costs of Generating Electricity 2020.

[f] آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی، 1399

[g] https://www.bpastudies.org/bpastudies%20/article/view/170/318

[h] Combined Heat and Power Basics, energy.gov

[i] https://www.hydro.org/waterpower/why-hydro/affordable/

[j] https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74840.pdf

[k] https://www.sciencedirect.com/book/9780128196106/photovoltaic-solar-energy-conversion?via=ihub=

[l] IRENA - Renewable Power Generation Costs in 2021.

[m] Overview of geothermal energy conversion systems: Reservoir-wells-piping-plant-reinjection - ScienceDirect

[n] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004541

[o] http://www.i15.p.lodz.pl/strony/EIC/res/Description_of_technology_wave.html

**پیوست 2** فرضیات و داده‌های اقتصادی ورودی به مدل

| پارامتر اقتصادی | مقدار |
|---|---|
| نرخ تنزیل[a] | 7٪ |
| قیمت حامل‌های انرژی (بجز بنزین و سی‌ان‌جی که در سناریوها تعیین می‌شود) | ثابت به قیمت حقیقی سال پایه |
| صادرات انرژی | ادامه شرایط تحریم - برابر با مقدار سال پایه |
| هزینه مازاد دوگانه‌سوز کردن خودرو | 5٪ هزینه کل خودرو |
| قیمت خودرو بنزینی (پراید) | $ 7000 |
| شدت مصرف سوخت خودرو [b] | 7/3 لیتر بنزین یا مترمکعب گاز در هر 100 کیلومتر |

[a] عبدلی و حیدری، 1388. برآورد نرخ تنزیل مبتنی بر نرخ خطر برای ایران و چند کشور. نشریه پژوهش های اقتصادی ایران، (38).

[b] مقدس، کاهش مصرف سوخت در خودروی پراید با انتخاب استراتژی کنترل هیبریدی، ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست. 91.

**پیوست 3** محاسبات مربوط به بازگشت سرمایه

هزینه دوگانه سوز کردن خودرو در سال 1398(هزینه سرمایه‌گذاری): 5 میلیون تومان

قیمت سی‌ان‌جی: 657 تومان بر کیلوگرم، 500 تومان به مترمکعب

افت 10 تا 15 درصدی توان در صورت استفاده از سی‌ان‌جی: مسافت طی شده، به ازای مصرف هر متر مکعب گاز طبیعی ≈ مسافت طی شده با یک لیتر بنزین

قیمت بنزین: 1500 و 3000 تومان به لیتر (سهمیه‌ای و آزاد)

60 لیتر سهمیه ماهانه و فرض متوسط مصرف 80 لیتر در ماه خانوارها

از افزایش هزینه تعمیر و نگهداری خودرو در صورت استفاده از سی‌ان‌جی صرفنظر شده است. در عمل با در نظر گرفتن این هزینه‌ها دوره بازگشت سرمایه طولانی‌تر خواهد شد.

از آنجایی‌که دوره بازگشت سرمایه تنها محاسبه شده است کاهش عمر موتور در صورت استفاده از سی‌ان‌جی در موتور پایه بنزینی در نتایج موثر نیست.

با فرض نرخ تنزیل برابر با 5 درصد و با حل معادله پ2 مقدار n بدست می‌آید که زمان برگشت سرمایه را منعکس می‌سازد. در این معادله منافع همان هزینه اجتناب شده بنزین است.

$$\sum_{t=1}^{n} \frac{\text{هزینه} - \text{منافع}}{(1+i)^t} - \text{سرمایه گذاری} = 0$$

$$\sum_{t=0}^{n-1} \frac{12 \times (60 \times 1500 + 20 \times 3000) - 12 \times 80 \times 500}{(1+0.05)^t} - 5000000 = 0 \qquad \text{پ2}$$

$$\sum_{t=1}^{n} \frac{1320000}{(1+0.05)^t} - 5000000 = 0$$

$4 < n < 5$

با توجه به مقدار خالص هزینه اجتناب شده برابر با 1320000، مشخص می‌شود که در صورت دوگانه‌سوز کردن خودرو پایه بنزینی و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری سالانه، زمان برگشت سرمایه تغییر شایانی خواهد داشت.

## 7- مراجع


[1] Allen, M. R. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tone. *Nature*. No. 458, pp. 1163–1166, 2009.

[2] Climate Watch, last accessed 2022.

[3] Tiew, B.J., Shuhaimi, M., Hashim, H., Carbon emission reduction targeting through process integration and fuel switching with mathematical modeling, *Applied Energy*, Vol. 92, pp. 686-693, 2012. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.048.

[4] Jepma CJ, Munasinghe M. *Climate change policy: facts, issues and analysis*, Cambridge University Press, 1998.

[5] Marvão Pereira, A., Marvão Pereira, MR., Is fuel-switching a no-regrets environmental policy? VAR evidence on carbon dioxide emissions, energy consumption and economic performance in Portugal, *Energy Economics*, Vol. 32, pp. 227-242, 2010. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2009.08.002.

[6] Mahmoud, A, Shuhaimi, M. Abdel Samed, M., A combined process integration and fuel switching strategy for emissions reduction in chemical process plants, *Energy*, No. 34, pp. 190-195, 2009. https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.11.007

[7] Bertrand, V., Carbon and energy prices under uncertainty: A theoretical analysis of fuel switching with heterogeneous power plants, *Resource and Energy Economics*, Vol. 38, pp. 198-220, 2014. https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2014.08.001.

[8] Delarue, E.D., Ellerman, A.D., D'haeseleer, W.D., Robust MACCs? The topography of abatement by fuel switching in the European power sector, *Energy*, No. 35, pp.1465-1475, 2010. https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.003.

[9]Luh, S, Budinis, S, Giarola, S, Thomas J. Schmidt, Adam Hawkes, Long-term development of the industrial sector – Case study about electrification, fuel switching, and CCS in the USA, *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 133, pp. 106-126, 2020. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106602.

[10] Rehfeldt, M., Fleiter, T., Herbst, A., Eidelloth, S., Fuel switching as an option for medium-term emission reduction - A model-based analysis of reactions to price signals and regulatory action in German industry, *Energy Policy*, Vol. 147, pp. 111-189, 2020, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111889

[11] De Almeida, A., Lopes, A., Carvalho, A., Mariano, J., Nunes, C., Evaluation of fuel-switching opportunities in the residential sector, *Energy and Building*s, No. 36, pp. 195-203, 2004. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.11.003.

[12] Abadie, LM., Goicoechea, N., Galarraga, I., Adapting the shipping sector to stricter emissions regulations: Fuel switching or installing a scrubber? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 57, pp. 237-250, 2017. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.017.

[13] Chaaban, F.B, Mezher, T, Ouwayjan M., Options for emissions reduction from power plants: an economic evaluation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 26, pp. 57-63, 2004, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2003.08.002

[14] Mahmoud, A., Sunarso, J., A new graphical method to target carbon dioxide emission reductions by simultaneously aligning fuel switching, energy saving, investment cost, carbon credit, and payback time, *International Journal Energy Resources*. Vol. 42, pp. 1551–1562. 2018, DOI: 10.1002/er.3946

[15] Hao H, Liu ZW, Zhao FQ, Natural gas as vehicle fuel in China: a review. *Renew Sustain Energy Rev*. Vol. 62, pp. 521–33. 2016, https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.015

[16] Moniz E J, Jacoby H D, Meggs A J M, Armstrong R. C., Cohn D R, Connors S. R., Deutch J M, Ejaz Q J, Hezir J S and Kaufman G M. *The future of natural gas*. Camb. MA Mass. Inst. Technol. Online, 2011, (http://mydocs.epri.com/docs/summerseminar11/presentations/03-02_moniz_mit_natural_gas_v1.pdf)

[17] Paltsev S, Jacoby H D, Reilly J M, Ejaz Q J, Morris J, O'Sullivan F, Rausch S, Winchester N, Kragha O, The future of US natural gas production, use, and trade, *Energy Policy*, Vol. 39, pp. 5309–21. 2011.
[18] Bossel, U. Well-to-wheel studies, heating values, and the energy conservation principle. Technical report. *European Fuel Cell Forum*, Morgenacherstrasse. 2003.
[19] Lenox, C. Kaplan, P. O, Role of natural gas in meeting an electric sector emissions reduction strategy and effects on greenhouse gas emissions. *Energy Econ*. Vol. 60, pp. 460–468, 2016.
[20] Levi M. Climate consequences of natural gas as a bridge fuel. *Clime Change*, Vol. 118, pp. 609–23. 2013.
[21] Wilson, I.A.G., Staffell, I. Rapid fuel switching from coal to natural gas through effective carbon pricing. *Nature Energy*, Vol. 3, pp. 365–372. 2018. https://doi.org/10.1038/s41560-018-0109-0
[22] Howarth RW. A bridge to nowhere: methane emissions and the greenhouse gas footprint of natural gas. *Energy Sci Eng*. 2014.
[23] Howarth, R. Shindell, D. Santoro, R. Ingraffea, A. Phillips, N. Townsend-Small, A. *Methane Emissions from Natural Gas Systems.* Background Paper Prepared for the National Climate Assessment, Reference number 2011-0003; Department of Ecology and Evolutionary Biology, Cornell University: Ithaca, NY, U.S., 2012.
[24] Zhang X., Myhrvold N., Caldeira K., Key factors for assessing climate benefits of natural gas versus coal electricity generation. *Environmental Research Letters*. Vol. 9, pp. 114-122. 2014. doi:10.1088/1748-9326/9/11/114022
[25] Kliucininkas, L, Matulevicius, J, Martuzevicius, D. The life cycle assessment of alternative fuel chains for urban buses and trolley buses. J *Environ Management*. Vol. 99, pp. 98–103, 2012. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.012
[26] Tong F., Jaramillo P., Azevedo M. L., Comparison of Life Cycle Greenhouse Gases from Natural Gas Pathways for Light-Duty Vehicles. *Energy Fuels*. Vol. 29, pp. 6008 −6018. 2015. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b01063.
[27] Brynolf, S., Fridell, E., Andersson, K., Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 74, pp. 86-95, 2014. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.052
[28] Myhrvold NP, Caldeira K., Greenhouse gases, climate change and the transition from coal to low-carbon electricity. *Environ Res Let*, 2012.
[29]Yuan, JH., Zhou, S., Peng, TD., Wang, GH., Ou, XM., Petroleum substitution, greenhouse gas emissions reduction and environmental benefits from the development of natural gas vehicles in China, *Petroleum Science*. Vol. 15, pp. 644–656. 2008. https://doi.org/10.1007/s12182-018-0237-y
[30] Edwards R, Hass H, Larive J, Lonza L, Mass H, Rickeard D. *Well-to-wheel analysis of future automotive fuels and power trains in the European context*. Well-to-wheels report version 4.a. Joint Research Centre, European Union, 2014.
[31] Lee, DY, Elgowainy, A, Dai Q, Life cycle greenhouse gas emissions of hydrogen fuel production from Chlor-Alkali processes in the United States. *Applied Energy*, Vol. 217, pp. 467–79, 2018.
[32] IIASA: international Institute for Applied Systems Analysis
[33] *MESSAGE model documentation*. Last accessed at May 2022. https://docs.messageix.org/en/stable/model/MESSAGE/model_core.html
[34] Fereidooni, A, Fereidooni, M, Moradi, S, Zargar, G, Ganjeh Ghazvini, M., A Screening Analysis of Conventional Reservoirs for Nitrogen and Dry Gas Injection by Using a Combination of Experimental Design Techniques and Compositional Reservoir Simulation. *Journal of Petroleum Research*, Vol. 24, pp. 135-146, 2014.
[35] Gharcheh Beydokhti, A, Khamehchi, E. Production Enhancement of an Oil Field using Integrated Modeling and Optimal Control. *Journal of Petroleum Research*, Vol. 29, pp. 34-45, 2019.
[36] IEA. *Global Gas Flaring Data, Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR)*. Last accessed May 2022. https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction/global-flaring-data
[37] Methane Tracker, *Interactive database of country and regional estimates for methane emissions and abatement options.* Last accessed May 2022. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/methane-tracker
[38] OPEC Annual Statistical Bulletin, 2022.